

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

ANIS ASSAD NETO

IMPACTO DA FLEXIBILIDADE DA INDÚSTRIA 4.0 NOS INDICADORES DE
DESEMPENHO DE UM SISTEMA DE PRODUÇÃO PUXADO

CURITIBA

2019

ANIS ASSAD NETO

IMPACTO DA FLEXIBILIDADE DA INDÚSTRIA 4.0 NOS INDICADORES DE
DESEMPENHO DE UM SISTEMA DE PRODUÇÃO PUXADO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção, área de concentração em Inovação em Projetos, Produtos e Processos.

Orientador: Prof. Dr. Fabiano Oscar Drozda

CURITIBA

2019

Catálogo na Fonte: Sistema de Bibliotecas, UFPR
Biblioteca de Ciência e Tecnologia

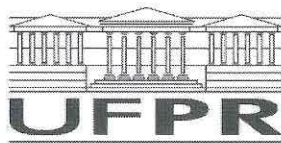
A844i Assad Neto, Anis

Impacto da flexibilidade da indústria 4.0 nos indicadores de desempenho de um sistema de produção puxado [recurso eletrônico] / Anis Assad Neto, 2019.

Dissertação (mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, área de concentração em Inovação em Projetos, Produtos e Processos, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná Orientador: Prof. Dr. Fabiano Oscar Drozda

1. Controle de produção. 2. Administração da produção. I. Universidade Federal do Paraná. II. Drozda, Fabiano Oscar. III. Título.

CDD 658.5



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SETOR SETOR DE TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO ENGENHARIA DE
PRODUÇÃO - 40001016070P1

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em ENGENHARIA DE PRODUÇÃO da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado de **ANIS ASSAD NETO** intitulada: **Impacto da Flexibilidade da Indústria 4.0 nos Indicadores de Desempenho de um Sistema de Produção Puxado**, após terem inquirido o aluno e realizado a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua Aprovação no rito de defesa.

A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

Curitiba, 27 de Fevereiro de 2019.

FABIANO OSCAR DROZDA

Presidente da Banca Examinadora (UFPR)

FERNANDO DESCHAMPS

Avaliador Externo (PUC/PR)

MARCELO GEHELE CLETO

Avaliador Interno (UFPR)

CASSIUS TADEU SCARPIN

Avaliador Interno (UFPR)

Dedico este trabalho à mulher da minha vida, Fernanda Medeiros Assef.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador Fabiano, não apenas por me guiar de maneira perfeita nesta introdução ao mundo científico, mas também pela enorme amizade, a qual supera as fronteiras acadêmicas e com certeza seguirá para o restante de nossas vidas.

Aos meus pais, Abrão e Maria Rita, por me prepararem da melhor forma para enfrentar os desafios da vida, e por me deixarem livre para seguir meus sonhos e aspirações.

Ao meu irmão Gabriel, pelas conversas e risadas de todos os dias, pela confiança e pela parceria absoluta que só irmãos conseguem construir.

À Fernanda, por ser a mulher com a qual eu estou construindo a minha vida, por ser minha principal incentivadora e minha maior inspiração.

À Laura, Julio e Vinicius, minha família estendida, pelo carinho de todos os dias.

Aos amigos Nicolas e Gustavo, colegas da graduação e do PPGEPP, pelas inúmeras reflexões e discussões acerca do método científico e dos desafios da Engenharia de Produção.

Aos Professores e amigos Marcos e Mariana, por - acima de tudo - sempre me tratarem com respeito, e por me ensinarem tantas coisas sobre temas de pesquisa tão apaixonantes.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo fornecimento de bolsas de estudo e estrutura de pesquisa.

“Não há palavra ou segmento racional para descrever com propriedade algumas experiências que se eternizam apenas pelo seu existir. É como tentar interpretar com nossa linguagem os últimos cinco minutos do sol antes de se recolher a oeste por trás de uma montanha. Há tantas sensações nisso, e tão poucos recursos linguísticos para descrevê-las. E o mais paradoxal disso é o que aprendi com Dostoiévski: o mais imbecil dos homens convive melhor com isso do que aqueles que se revestem de conceitos e oratórias...”

Ao contrário do que dizia o grande mestre Platão, o homem racional não atinge a luz e as alturas mais elevadas, mas sim, se recolhe em sua toca lúgubre e sombria com todos os conceitos apreendidos... vive como um rato... um rato dotado de uma privilegiada consciência.

Sinto a inoperância da racionalidade cada vez que percebo o quão ineficaz são meus argumentos diante de um olhar, diante do vazio, diante do imponderado...”

Alailson de Oliveira

RESUMO

O desenvolvimento do projeto alemão Indústria 4.0 marca a ascensão de um novo contexto na gestão de operações, no qual consumidores exigem a personalização de seus produtos e uma maior flexibilização da produção. O efeito da adoção dessas políticas no desempenho dos populares sistemas de controle de produção puxado (SCPP) não foi endereçado por pesquisas anteriores, até onde consta para o autor. O objetivo deste trabalho é analisar o impacto da flexibilidade atrelada à Indústria 4.0 em diferentes SCPP, por meio de um planejamento de experimentos em um modelo de sistema de produção. O modelo foi exposto a diferentes cenários de flexibilidade a partir da variação dos níveis de 2 fatores experimentais: quantidade de tipos de produtos e heterogeneidade de tempo de processamento entre os tipos de produtos. Foram investigados 3 SCPP: Sistema de Controle Kanban (SCK), Sistema de Controle Kanban Estendido com política de cartões dedicada (SCKE-D) e Sistema de Controle Kanban Estendido com política de cartões compartilhada (SCKE-C). Os parâmetros ajustáveis dos SCPP foram otimizados, em cada cenário experimentado, com o objetivo de minimizar o nível de estoques e obter um nível de serviço mínimo de 95%. Os resultados mostram que os desempenhos dos 3 SCPP sofrem efeito significativo devido ao incremento de flexibilidade. O SCKE-C obteve o melhor desempenho em todos os cenários analisados, sendo superior especialmente em condições de alta quantidade de tipos de produtos. Apesar do desempenho inferior nos outros cenários, o SCK obteve desempenho estreitamente superior ao SCKE-D em condições de baixa quantidade de tipos de produtos e alta heterogeneidade de tempo de processamento.

Palavras-chave: Flexibilidade. Indústria 4.0. Simulação. Sistema de Controle de Produção Puxado.

ABSTRACT

The development of Industry 4.0 marks the rise of a new context in operations management, in which consumers demand customization of their products and greater flexibility in production. The effect of the adoption of these policies on the performance of the popular pull production control systems (PPCS) was not addressed by previous research, as far as the author is concerned. This work aims to evaluate the impact of Industry 4.0 flexibility in different types of PPCS, through simulation experiments performed in a production system model. The model was exposed to different flexibility scenarios by varying the levels of 2 experimental factors: quantity of product types and processing time heterogeneity among product types. 3 PPCS were investigated: Kanban Control System (KCS), Extended Kanban Control System with dedicated card policy (EKCS-D) and Extended Kanban Control System with shared card policy (EKCS-C). The adjustable parameters of the PPCS were optimized in each experiment scenario in order to minimize the inventory level and obtain a minimum service level of 95%. The results show that the performances of the 3 PPCS are significantly affected by increased flexibility levels. EKCS-C achieved the best performance in all the analyzed scenarios, being especially superior in environments exposed to a high quantity of product types. Despite the inferior performance in the other scenarios, KCS obtained a better performance than EKCS-D in conditions of low product types quantity and high processing time heterogeneity.

Keywords: Flexibility. Industry 4.0. Simulation. Pull Production Control System.

LISTA DE SIGLAS

| | |
|-----------|--|
| AG | - Algoritmo Genético |
| BK-CONWIP | - Base stock Kanban Constant Work-in-Process |
| CV | - Coeficiente de variação |
| ECEB | - Estratégia de Controle de Estoque Base |
| HK-CONWIP | - Hybrid Kanban Constant Work-in-Process |
| PDK-C | - Política de Distribuição de Kanbans Compartilhada |
| PDK-D | - Política de Distribuição de Kanbans Dedicada |
| RSL | - Revisão Sistemática de Literatura |
| SCPP | - Sistema de Controle de Produção Puxado |
| SCK | - Sistema de Controle Kanban |
| SCKE | - Sistema de Controle Kanban Estendido |
| SCKE-C | - Sistema de Controle Kanban Estendido Compartilhado |
| SCKE-D | - Sistema de Controle Kanban Estendido Dedicado |
| SFC | - Sistemas Físico Cibernéticos |

LISTA DE SÍMBOLOS

| | |
|----------------|--|
| N | - Número de estágios de produção no sistema de manufatura. |
| PM_j | - Processo de manufatura do estágio j . |
| M | - Número de produtos manufaturados no sistema. |
| λ | - Taxa de demanda individual e homogênea de cada tipo de produto. |
| μ_i | - Taxa de serviço de um produto do tipo i em um processo de manufatura. Inverso de t_i . |
| t_i | - Tempo de processamento de um produto do tipo i em um processo de manufatura. |
| λ_A | - Taxa de demanda agregada de todos os tipos de produto. |
| μ_A | - Taxa de serviço média entre todos os tipos de produtos manufaturados. |
| ρ | - Índice de utilização de capacidade. |
| t_A | - Tempo de processamento médio entre todos os tipos de produtos manufaturados. |
| $M/M/1$ | - Modelo de fila elementar de único <i>server</i> , onde as chegadas são determinadas por um Processo Poisson e as taxas de serviço são exponencialmente distribuídas. |
| L | - Quantidade média de consumidores em um sistema de filas em equilíbrio. |
| W | - Tempo médio de espera dos consumidores em um sistema de filas em equilíbrio. |
| H | - Percentual de heterogeneidade de tempo de processamento entre os produtos, em relação ao tempo médio t_A . |
| h | - Heterogeneidade, em valor absoluto, entre 2 produtos em ordem crescente de tempo de processamento. |
| I_{ij} | - Fila de produtos de tipo i , com kanbans anexados, ao final do estágio j . |
| K_{ij} / K_j | - Fila de kanbans disponíveis no estágio j para autorização da produção de produtos do tipo i . Em um SCKE com PDK-C a fila contempla todos os tipos de produto. |
| D_{ij} / D_i | - Fila de demandas de produtos do tipo i . No SCKE é replicada em cada estágio j ; no SCK só existe ao final do processo. |

| | |
|----------------|---|
| s_{ij} | - Quantidade de estoque base inicial parametrizada para a fila lij tanto em um SCK, quanto em um SCKE. |
| P_j | - Lista de produtos demandados para um estágio i em ordem decrescente de prioridade. |
| c_i / c_{ij} | - Quantidade de cartões Kanbans disponíveis em cada estágio j parametrizados para o início da operação de um SCKE. |
| T | - Tempo de execução de um experimento de simulação. |
| I | - Tempo de <i>warm-up</i> de um experimento de simulação para o alcance de estabilidade. |
| θ | - Refere-se ao conjunto de parâmetros específicos de um SCPP (s e c), os quais podem ser otimizados. |
| Θ | - Conjunto dos valores factíveis para θ . |
| Ψ | - Indica a resposta de um modelo de simulação, como uma função que recebe parâmetros de entrada. |
| a | - Efeito estocástico atuante em um modelo de simulação, que interfere no desempenho de cada replicação experimental. |
| n | - Valor utilizado para representar quantidades em diferentes etapas do trabalho, e.g. número de indivíduos que compõe uma população de um algoritmo genético. |
| δ | - Valor de penalização à função <i>fitness</i> do algoritmo genético quando há quebra de restrição. |
| r | - Quantidade de replicações de experimentos. |
| p | - Probabilidade de mutação de um bit em um algoritmo genético. |
| q | - Quantidade de proles nascidas em uma geração do algoritmo genético. |
| Σ | - Desvio padrão entre uma série de valores. |
| \bar{x} | - Valor médio para uma série de valores. |
| θ^*_k | - Parâmetros de um SCPP otimizados para um cenário experimental k . |
| R_{ij} | - Resposta obtida pelo experimento de configuração i em sua replicação j . |
| A | - Nível de significância utilizado para a construção de intervalos de confiança. |

- e_{ir} - Efeito estatístico principal de um fator i após uma replicação r .
- \bar{e}_i - Efeito principal médio de um fator i a partir de replicações.
- S^2_j - Variância entre os efeitos principais replicados para um fator i .

SUMÁRIO

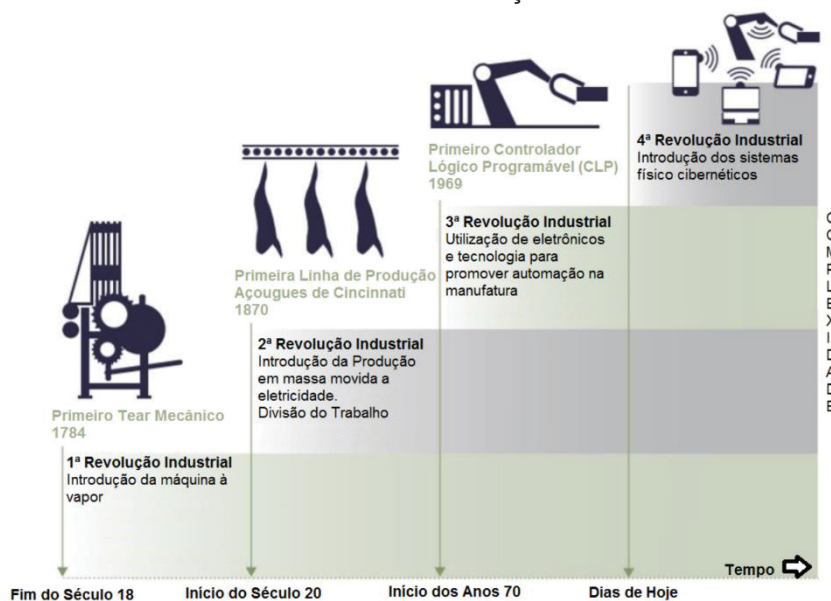
| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 15 |
| 1.1 | JUSTIFICATIVA..... | 17 |
| 1.1.1 | Perspectiva acadêmica..... | 17 |
| 1.1.2 | Perspectiva industrial..... | 19 |
| 1.2 | OBJETIVO GERAL..... | 20 |
| 1.3 | OBJETIVOS ESPECÍFICOS | 21 |
| 1.4 | ESTRUTURA DO TRABALHO | 21 |
| 2 | REVISÃO DE LITERATURA..... | 22 |
| 2.1 | FLEXIBILIDADE DE MANUFATURA..... | 22 |
| 2.1.1 | Tipos de flexibilidade de manufatura | 23 |
| 2.1.2 | Classificações taxonômicas da flexibilidade de manufatura | 32 |
| 2.2 | INDÚSTRIA 4.0 E A FLEXIBILIDADE | 35 |
| 2.3 | SISTEMAS DE CONTROLE DE PRODUÇÃO PUXADO | 40 |
| 2.3.1 | Estratégias elementares de controle puxado..... | 40 |
| 2.3.2 | Estratégias híbridas de controle puxado..... | 42 |
| 2.3.3 | Controle puxado em ambientes de flexibilidade | 43 |
| 3 | MÉTODO | 44 |
| 3.1 | ETAPAS DA PESQUISA | 45 |
| 3.2 | OS LIMITES DO MÉTODO | 47 |
| 3.3 | CLASSIFICAÇÃO DO MÉTODO DE PESQUISA..... | 48 |
| 3.4 | MODELAGEM DO SISTEMA DE PRODUÇÃO..... | 50 |
| 3.5 | FATORES DE FLEXIBILIDADE E INDICADORES DE DESEMPENHO | 52 |
| 3.5.1 | Fator quantidade de tipos de produtos | 53 |
| 3.5.2 | Fator heterogeneidade de tempo de processamento | 54 |
| 3.5.3 | Indicadores de desempenho | 59 |
| 3.6 | MECANISMO DE UM SISTEMA DE PRODUÇÃO PUXADO..... | 60 |
| 3.6.1 | Sistema de controle Kanban para múltiplos produtos..... | 60 |
| 3.6.2 | Sistema de controle Kanban estendido para múltiplos produtos | 62 |
| 3.7 | IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL DO MODELO DE SIMULAÇÃO.... | 64 |
| 3.8 | OTIMIZAÇÃO DE SIMULAÇÃO PARA PARÂMETROS DOS SCPP | 71 |
| 3.8.1 | Algoritmo genético para otimização da simulação..... | 73 |
| 3.8.2 | Análise de sensibilidade do algoritmo genético | 82 |
| 3.9 | ESTRATÉGIA DE OBTENÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS..... | 85 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 4 | RESULTADOS E DISCUSSÃO | 89 |
| 4.1 | RESULTADOS DA OTIMIZAÇÃO DOS PARÂMETROS | 89 |
| 4.2 | ANÁLISE DOS PARÂMETROS OTIMIZADOS | 92 |
| 4.2.1 | Parâmetros Sistema de Controle Kanban | 93 |
| 4.2.2 | Parâmetros Sistema de Controle Kanban Estendido Dedicado | 94 |
| 4.2.3 | Parâmetros Sistema de Controle Kanban Estendido Compartilhado | 97 |
| 4.3 | RESULTADOS DOS EXPERIMENTOS | 98 |
| 4.4 | EFEITO DA FLEXIBILIDADE NOS SISTEMAS PUXADOS | 100 |
| 4.4.1 | Efeito no Sistema de Controle Kanban | 101 |
| 4.4.2 | Efeito no Sistema de Controle Kanban Estendido Dedicado | 102 |
| 4.4.3 | Efeito no Sistema de Controle Kanban Estendido Compartilhado | 103 |
| 5 | CONCLUSÃO..... | 106 |
| | REFERÊNCIAS..... | 108 |
| | APÊNDICE 1 – PROTOCOLO REVISÃO SISTEMÁTICA..... | 116 |
| | APÊNDICE 2 – CÓDIGO ALGORITMO DE SIMULAÇÃO | 125 |
| | APÊNDICE 3 – RELATÓRIO VERIFICAÇÃO E VALIDAÇÃO..... | 132 |
| | APÊNDICE 4 – CÓDIGO ALGORITMO FILAS M/M/1 | 135 |
| | APÊNDICE 5 – CÓDIGO ALGORITMO GENÉTICO | 137 |
| | APÊNDICE 6 – RESULTADOS DETALHADOS..... | 144 |

1 INTRODUÇÃO

A chegada de uma quarta revolução industrial sinaliza uma alteração no ambiente da manufatura, capaz de causar rupturas nos tradicionais modelos de negócios e métodos de gestão de processos (SCHWAB, 2016). Apesar de não haver visão unificada quanto ao que caracteriza uma revolução industrial, quatro estágios são comumente identificados na história (LIAO et al., 2017), conforme apresentado na FIGURA 1. Essa quarta revolução é caracterizada pela introdução na indústria de sistemas de *hardware* e *software* que atrelam os mundos físico e digital, os chamados sistemas físicos cibernéticos (SFC) (COLOMBO et al., 2017). O emprego dos SFC permite a utilização de sensores e interconexão de máquinas para a geração e análise de um alto volume de dados em tempo real. Consequentemente, é possível a concepção de uma fábrica inteligente, com recursos produtivos auto adaptáveis (LEE, BAGHERI e KAO, 2014; WANG, TÖRNGREN e ONORI, 2015).

FIGURA 1 – AS QUATRO REVOLUÇÕES INDUSTRIAIS



FONTE: Adaptado de DFKI (2013).

Como produto dessa revolução, Radziwon et al. (2014) coloca que a fábrica inteligente conta com processos produtivos tão flexíveis que é possível se adaptar de forma rápida para que problemas sejam resolvidos prontamente. O projeto alemão Indústria 4.0 – uma das principais iniciativas no contexto da quarta revolução industrial – propõe a concepção de sistemas de produção flexíveis e reconfiguráveis, através de uma série de integrações sistêmicas (WANG et al., 2016). Esse incremento de

flexibilidade observado surge a partir da necessidade de adequar o ambiente de operações a um novo contexto (LASI, 2014), visto que o crescimento na adoção da tecnologia da informação e mídias sociais tem influenciado cada vez mais a percepção dos consumidores em relação à inovação, qualidade, variedade e velocidade de entrega dos produtos (LEE, KAO e YANG, 2014). Nesse sentido, mudanças esperadas para a indústria são, entre outras: períodos curtos de desenvolvimento de produto; individualização na demanda e flexibilização da produção (LASI, 2014).

A flexibilidade externa – representada pelas vantagens competitivas adquiridas junto ao mercado – deve ser acompanhada por uma flexibilidade interna, que consiste na capacidade de uma empresa em se adaptar ao ambiente, por meio de estratégias operacionais (UPTON, 1994). Nesse sentido, pesquisas em torno do fenômeno da quarta revolução industrial têm tido um maior foco em aspectos eletrônicos e computacionais (e.g. transmissão de dados, computação em nuvem) para estudar como os SFC podem flexibilizar a indústria (LIU e XU, 2017; LU, 2017). Contudo, possibilitar o alcance de uma maior flexibilidade apenas através de mudanças no âmbito da tecnologia de informação não contempla os desafios resultantes para a gestão dos sistemas de produção. É necessário verificar se as estratégias de controle de produção vigentes mantêm sua efetividade no novo contexto de flexibilidade da Indústria 4.0.

Em especial, ambientes de manufatura orientados por sistemas de controle de produção puxado (SCPP), populares na indústria e academia desde a introdução do conceito da manufatura enxuta, tem sido majoritariamente estudados em ambientes industriais com flexibilidade limitada (BOKHORST e SLOMP, 2010), bem como tem tido seu desempenho questionado em ambientes com condições de flexibilidade mais elevada (KRISHNAMURTHY et al., 2004). Sistemas que operam sob uma estratégia puxada têm como principal característica o uso de mecanismos para o limite explícito do nível de inventário dentro do sistema de manufatura (HOPP e SPEARMAN, 2013). Estes mecanismos são geralmente implementados através do uso de cartões (THÜRER, STEVENSON e PROTZMAN, 2016). O efeito da flexibilidade atrelada à Indústria 4.0 no desempenho de um SCPP não foi endereçada na literatura, até onde consta para o autor.

Para a realização desse tipo de análise, uma ferramenta útil é a simulação, uma vez que esta permite a construção de um modelo para imitar um processo ou sistema do mundo real, de modo que conclusões sejam tiradas quanto a suas

características operacionais. Ademais, com o auxílio de técnicas de planejamento de experimentos, é possível estudar o impacto de diferentes níveis de fatores de entrada (e.g. níveis de flexibilidade, tipo de SCPP) em variáveis resposta de saída (e.g. indicadores de desempenho de estoques e nível de serviço), por meio da construção de múltiplos cenários (BANKS, 1998; KLEIJNEN, 2005; LAW, 2014).

A partir do contexto apresentado, a questão de pesquisa a ser respondida é colocada da seguinte forma: qual é o impacto da flexibilidade atrelada à Indústria 4.0 nos indicadores de desempenho de um sistema de produção puxado?

1.1 JUSTIFICATIVA

A importância do trabalho pode ser justificada sob a perspectiva acadêmica e industrial.

1.1.1 Perspectiva acadêmica

Uma das formas de justificar a relevância da pesquisa é observar o crescente interesse acadêmico em pesquisas para uma melhor compreensão do fenômeno da quarta revolução industrial e seus impactos. A quantidade de publicações na base de dados SCOPUS que contenham os termos (no idioma inglês) quarta revolução industrial ou Indústria 4.0, desde 2012 até 2018, pode ser observada na FIGURA 2. Para que a tendência de crescimento do tema possa ser comparada à tendência de crescimento da pesquisa de Engenharia como um todo, na figura também está apresentada a quantidade total de publicações dentro do tema “Engenharia”, conforme classificação da base SCOPUS. O baixo número de publicações quando comparado a temas já estabelecidos da Engenharia, acompanhado por um aumento da inclinação da curva de publicações a cada ano analisado (2012 - 2018), pode denunciar a existência de uma lacuna na literatura. Nesse sentido, Hofmann e Rüsch (2017) argumentam que os conceitos sobre o tema continuam imprecisos e sem definições estabelecidas.

FIGURA 2 – NÚMERO DE PUBLICAÇÕES SOBRE A QUARTA REVOLUÇÃO INDUSTRIAL



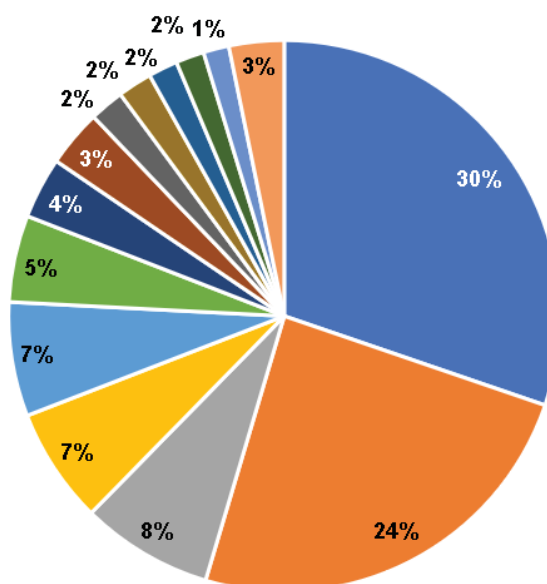
FONTE: O autor (2019).

Um outro aspecto importante é observar em quais áreas do conhecimento são publicados os trabalhos. Para os mesmos parâmetros da análise anterior, ainda na base de dados SCOPUS, observa-se essa distribuição na FIGURA 3.

FIGURA 3 – ÁREAS DE CONHECIMENTO DA QUARTA REVOLUÇÃO INDUSTRIAL

% das publicações

- Engenharia
- Ciência da computação
- Negócios e gestão
- Matemática
- Ciências de decisão
- Ciências de materiais
- Astronomia e física
- Ciências sociais
- Energia
- Ciência ambiental
- Engenharia química
- Química
- Economia
- Outros



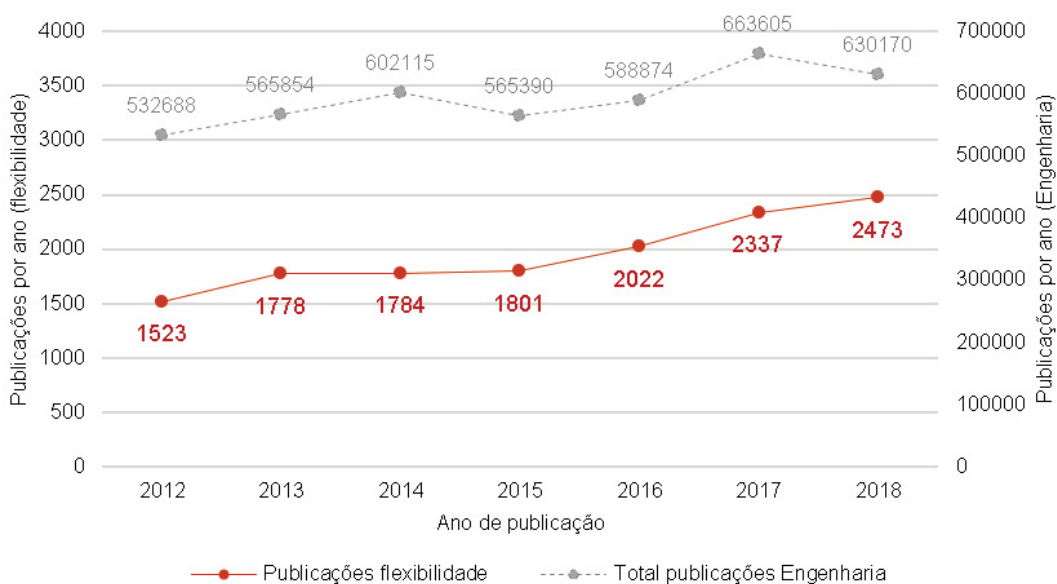
FONTE: O autor (2019).

As duas principais áreas de conhecimento identificadas são a engenharia e a ciência da computação. O resultado já era esperado, dado que a concepção de uma fábrica inteligente consiste na implementação de soluções de tecnologia de informação nos processos de manufatura, um campo de intersecção dessas áreas de

conhecimento. Contudo, verifica-se que estudos na área da gestão e ciências de decisão – onde o presente trabalho poderia ser situado – representam apenas 8% e 7% das publicações, respectivamente, indicando a importância de mais pesquisas com esses enfoques.

De forma complementar, o crescimento do interesse dos pesquisadores por temas ligados diretamente à flexibilidade de manufatura pode ser razoavelmente mensurado através das publicações na base SCOPUS que contenham os termos, também em inglês, flexibilidade ou customização, acompanhados dos termos produção ou manufatura, conforme apresentado na FIGURA 4. Mais uma vez, a quantidade total de publicações na área de Engenharia é mostrada no eixo secundário do gráfico para a comparação das tendências de crescimento.

FIGURA 4 – NÚMERO DE PUBLICAÇÕES SOBRE FLEXIBILIDADE DE MANUFATURA



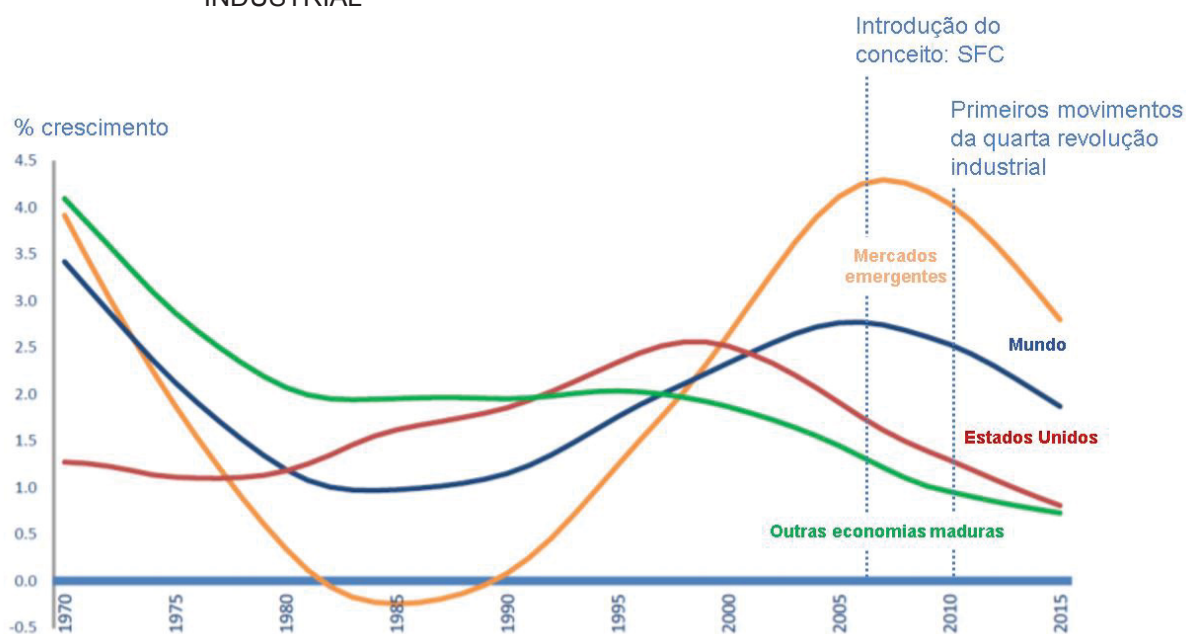
FONTE: Adaptado de Scopus (2019).

1.1.2 Perspectiva industrial

Para os gerentes de produção e outros profissionais da indústria, o presente estudo tem o papel de projetar alterações de desempenho de um sistema de produção puxado após a implantação de fábricas inteligentes mais flexíveis. No contexto atual, o estudo de indicadores industriais tem ainda um fator adicional de importância, visto que se observa uma desaceleração no crescimento da produtividade industrial global (BRYNJOLFSSON, ROCK e SYVERSON, 2017). Brynjolfsson, Rock e Syverson

(2017) identificaram que o aumento de produtividade nos Estados Unidos foi reduzido pela metade na última década, apesar da introdução de tecnologias como a inteligência artificial na indústria, diretamente relacionada ao conceito da Indústria 4.0. Os autores, contudo, não buscaram uma relação causal entre a flexibilização dos sistemas produtivos e os indicadores de produtividade. Na FIGURA 5 é apresentado um gráfico com as taxas de crescimento da produtividade mundial, em percentual, com destaque para as datas onde houve a introdução do conceito de SFC e o início do movimento da quarta revolução industrial.

FIGURA 5 – CRESCIMENTO DA PRODUTIVIDADE MUNDIAL E A QUARTA REVOLUÇÃO INDUSTRIAL



FONTE: Adaptado de Brynjolfsson, Rock e Syverson (2017).

É possível observar, para todos os grupos, que picos de crescimento de produtividade foram obtidos previamente à introdução dos conceitos das fábricas inteligentes. O presente estudo busca elucidar potenciais relações entre a implantação dessas fábricas e a alteração de indicadores de desempenho industrial, avaliando a flexibilidade como fator causal.

1.2 OBJETIVO GERAL

Este trabalho busca analisar o impacto da flexibilidade atrelada à Indústria 4.0 no desempenho de um sistema de produção puxado.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

A obtenção do objetivo geral é alcançada através da realização dos objetivos específicos enumerados a seguir.

- a) Identificar as características da flexibilidade de manufatura atrelada à Indústria 4.0;
- b) Modelar conceitualmente um sistema de produção adequado para a operação de SCPP;
- c) Implementar computacionalmente o modelo para a condução de experimentos de simulação;
- d) Analisar o efeito da flexibilidade atrelada à Indústria 4.0 nos indicadores de desempenho dos principais SCPP propostos na literatura.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente estudo se encontra segmentado em cinco capítulos. No capítulo 2 são apresentados os levantamentos bibliográficos sobre os tópicos relevantes ao tema de pesquisa: a flexibilidade de manufatura é definida e classificada com auxílio de uma revisão sistemática de literatura (RSL); a relação da flexibilidade com o contexto da quarta revolução industrial e o projeto Indústria 4.0 é investigada em detalhe; os SCPP também são revisados. No capítulo 3 é descrito o método de pesquisa empregado no trabalho, o qual envolveu a modelagem conceitual de um sistema produtivo, o planejamento de experimentos de simulação e a implementação computacional do modelo de simulação. Os resultados e discussões se encontram apresentados no capítulo 4. Durante esse capítulo o efeito da flexibilidade é mensurado em diferentes modalidades de SCPP. Por fim, o capítulo 5 apresenta a conclusão do trabalho.

2 REVISÃO DE LITERATURA

Neste capítulo são revisados os temas necessários para o desenvolvimento da pesquisa (*i.e.*, flexibilidade de manufatura, flexibilidade e a Indústria 4.0 e SCPP). Em especial, os tipos de flexibilidade e suas classificações taxonômicas são investigados a partir de uma RSL.

2.1 FLEXIBILIDADE DE MANUFATURA

Flexibilidade pode ser definida como a habilidade em ser maleável (SLACK, 1983). Dentro do âmbito da manufatura, a flexibilidade pode ser ainda definida como a habilidade em mudar ou reagir com baixa penalização de tempo, esforço, custo ou desempenho (UPTON, 1994). A parcela mais substancial do estudo da flexibilidade na manufatura se iniciou com importantes trabalhos que datam dos anos 80, como pode ser observado em Slack (1983) e Gerwin (1987), no contexto do advento do sistema de manufatura flexível. Contudo, trabalhos de teoria econômica que apresentaram o tema podem ser encontrados já no início da década de 20 (SETHI e SETHI, 1990).

Apesar de haver convergência de opinião quanto a importância da flexibilidade para os sistemas produtivos, ainda não há consenso sobre uma definição única para a flexibilidade de manufatura (ROGERS, OJHA e WHITE, 2011). Buscas na literatura esbarram em uma infinidade de taxonomias, muitas vezes redundantes e algumas vezes contraditórias. Nesse sentido, foi proposto neste trabalho a RSL para identificação de quais são os diferentes tipos de flexibilidade existentes no contexto da manufatura, bem como de que forma a flexibilidade de um sistema produtivo pode ser classificada.

O protocolo de RSL adotado neste trabalho é apresentado no APÊNDICE 1. A revisão do conteúdo dos trabalhos está dividida em duas partes. Em primeiro lugar são apresentados os tipos de flexibilidade de manufatura identificados na literatura. Em segundo lugar são apresentados como esses tipos podem ser classificados em diferentes taxonomias.

2.1.1 Tipos de flexibilidade de manufatura

No total foram observados 31 diferentes tipos de flexibilidade. Para cada tipo de flexibilidade mencionado em um dos 26 artigos coletados, foi verificado se o próprio autor estabeleceu uma definição, se foi utilizado uma referência, ou se só ocorreu uma menção do termo sem qualquer tipo de definição apresentada. A lista completa dos tipos de flexibilidade identificados em cada artigo está dividida entre o QUADRO 1 e o QUADRO 2. Nos quadros também é possível identificar quando um autor estabeleceu uma definição e quando um autor fez uma citação ou meramente mencionou o termo.

A revisão de conteúdo se inicia com uma breve análise das principais contribuições conceituais, ao longo dos anos, entre os artigos coletados. Slack (1983) propôs uma distinção entre as palavras dimensões e tipos no contexto da flexibilidade. O autor identificou 3 dimensões para a flexibilidade: amplitude, tempo e custo, dentro das quais se estabelecem 5 diferentes tipos. A definição de flexibilidade de “qualidade” que o autor propôs é praticamente exclusiva na literatura. A revista onde o artigo foi publicado, *International Journal of Operations & Production Management* se tornou um importante veículo de difusão de artigos sobre flexibilidade na manufatura antes dos anos 2000 (já no novo milênio, observa-se uma predominância de artigos publicadas na *International Journal of Production Research*).

Browne et al. (1984) publicaram um dos mais importantes trabalhos em seguida (1039 citações), onde os autores definiram 8 tipos de flexibilidade tendo um maior foco no processo produtivo. Gerwin (1987) contribuiu para o aumento dos termos encontrados através da definição de 7 tipos de flexibilidade, dos quais 5 não tinham sido identificados por Browne et al. (1984). O principal artigo do autor, contudo, veio alguns anos depois, onde ele analisou sua classificação de 1987 quanto às dimensões de amplitude e tempo, além de propor uma discussão sobre a natureza proativa ou reativa da flexibilidade (GERWIN, 1993).

Slack (1987), apesar de não trazer novos tipos de flexibilidade, argumenta que a flexibilidade sempre trata ou da variedade disponível (dimensão amplitude) ou da resposta frente à incerteza (dimensão custo ou tempo). A compreensão dessa dualidade auxilia no entendimento de definições contraditórias entre autores para os mesmos tipos de flexibilidade.

Son e Park (1987) propõem 4 tipos de flexibilidade, das quais a principal inovação é a definição de flexibilidade de demanda, exclusiva dentre os artigos analisados, e apenas citada na revisão de literatura de Gupta e Goyal (1989). A flexibilidade de demanda foi agrupada junto da flexibilidade externa proposta mais tarde por Upton (1994) e flexibilidade de mercado proposta por Sethi e Sethi (1990).

Sethi e Sethi (1990) definiram 11 tipos de flexibilidade com base na literatura disponível da época. Chen, Calantone e Chung (1992) propuseram definições originais para tipos já abordados de flexibilidade. Contudo, os autores também ofereceram uma definição para flexibilidade de trabalho, a qual ainda não tinha sido abordada pelos trabalhos anteriormente comentados e está diretamente ligada à capacidade cognitiva das pessoas envolvidas no processo produtivo. Os autores colocam que a flexibilidade relacionada às habilidades das pessoas foi identificada como chave no sucesso das experiências japonesas com sistemas de manufatura flexíveis, e até então não era abordada de forma substancial na literatura.

Upton (1994) contribui com mais algumas dimensões da flexibilidade em seu popular trabalho (1149 citações). O autor estabeleceu a classificação da flexibilidade quanto ao horizonte de tempo de implantação (estratégico, tático, operacional), bem como o nível de comprometimento necessário. Além disso, o autor defende a diferenciação da flexibilidade entre os conceitos de amplitude de possibilidades de mudança e mobilidade de mudança entre diferentes estados. Tal divisão é análoga a proposta por Slack (1983) (amplitude, custo, tempo). Porém, Upton (1994) ainda adicionou o conceito de uniformidade da mudança, que indica a capacidade do sistema produtivo em manter níveis de desempenho constantes ao realizar alterações entre os estados. Por fim, o autor propôs a diferenciação da flexibilidade interna – onde o foco está na operacionalização da mudança – e flexibilidade externa, onde o foco está na identificação das vantagens competitivas provenientes da mudança.

QUADRO 1 – TIPOS DE FLEXIBILIDADE POR AUTOR (1 – 15)

| Referência | Tipo de flexibilidade | | | | | | | | | | | | | | |
|-----------------------------------|-------------------------|--------------------------|----------------------|---------------------------|------------------------------|----------------------------|------------------------|------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------|--|--|---------------------------|---|---|
| | 1) | 2) | 3) | 4) | 5) | 6) | 7) | 8) | 9) | 10) | 11) | 12) | 13) | 14) | 15) |
| | Flexibilidade de volume | Flexibilidade de produto | Flexibilidade de mix | Flexibilidade de produção | Flexibilidade de modificação | Flexibilidade de amplitude | Flexibilidade de tempo | Flexibilidade de custo | Flexibilidade de prazo (operacional) | Flexibilidade de médio prazo (tática) | Flexibilidade de longo prazo (estratégica) | Flexibilidade de máquina (equipamento) | Flexibilidade de trabalho | Flexibilidade de (manuseio de) material | Flexibilidade de roteamento (re-roteamento) |
| Teich e Claus (2017) | ○ | ○ | ○ | | | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| Mishra, Pundir e Ganapathy (2017) | ○ | ○ | ○ | | | | | | | | | ○ | ○ | ○ | ○ |
| Pérez, Bedia e Fernández (2016) | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | | | | | | | ○ | ○ | | |
| Alavi (2016) | ○ | ○ | ○ | | | | | | | | | | | | |
| Kumar e Sharma (2015) | ○ | ○ | ○ | | | | | | | | | ○ | ○ | ○ | ○ |
| Wanstrom (2014) | ○ | ○ | ○ | | ○ | | | | | | | ○ | ○ | ○ | ○ |
| Rathje, Defforin e Anand (2014) | ○ | ○ | ○ | | | | | | | | | ○ | | ○ | ○ |
| Singholi, Ali e Sharma (2013) | ○ | ○ | | ○ | | | | | | | | ○ | | | ○ |
| Kim, Suresh e Hillmer (2013) | ○ | ○ | ○ | | | | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | | ○ |
| Seebacher e Winkler (2013) | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | | ○ | ○ |
| Idris, Rahman e Hassan (2013) | | ○ | | ○ | | | | | | | | ○ | | ○ | |
| Chang (2012) | ○ | ○ | | ○ | | | | | | | | ○ | | | ○ |
| Ali e Wadhwa (2010) | ○ | ○ | | ○ | | | | | | | | ○ | | | ○ |
| Rogers, Ojha e White (2011) | ○ | | ○ | | | | | | | | | ○ | ○ | | ○ |
| Koste e Malhotra (1999) | ● | ● | ● | | ● | ○ | | | | | | ● | ● | ● | ● |
| Suarez, Cusumano e Fine (1996) | ○ | ○ | ○ | | | | | | | | | | | | |
| Upton (1994) | ○ | ○ | ○ | | | | | | ● | ● | ● | ○ | ○ | | ○ |
| Gerwin (1993) | ● | ● | ● | | ● | ○ | | | | | | | | ● | ● |
| Chen, Calantone e Chung (1992) | ● | ● | ● | | | | | | | | | ● | ● | ● | ● |
| Sethi e Sethi (1990) | ● | ● | | ● | | | | | | | | ● | ● | ● | ● |
| Gupta e Goyal (1989) | ○ | ○ | | ○ | | | | | | | | ○ | | | ○ |
| Son e Park (1987) | | ● | | | | | | | | | | ● | | | |
| Slack (1987) | ○ | ○ | ○ | | | ○ | ○ | ○ | | | | | | | |
| Gerwin (1987) | ● | ● | ● | | ● | | | | | | | | | ● | ● |
| Browne et al. (1984) | ● | ● | | ● | | | | | | | | ● | | | ● |
| Slack (1983) | ● | ● | ● | | | ● | ● | ● | | | | | | | |

○ - Autor apenas listou o tipo de flexibilidade ou utilizou alguma referência bibliográfica.
● - Autor definiu o tipo de flexibilidade.

Fonte: O autor (2019).

QUADRO 2 – TIPOS DE FLEXIBILIDADE POR AUTOR (16 – 31)

| Referência | Tipo de flexibilidade | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|-----------------------------|-------------------------------|-----------------------|---|--------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|----------------------------|------------------------------|-------------------------------|-----------------------|------------------------|----------------------------|----------------------------|------------------------|
| | 16) | 17) | 18) | 19) | 20) | 21) | 22) | 23) | 24) | 25) | 26) | 27) | 28) | 29) | 30) | 31) |
| | Flexibilidade de mobilidade | Flexibilidade de uniformidade | Flexibilidade interna | Flexibilidade externa (mercado) (demanda) | Flexibilidade de entrega | Flexibilidade de expansão | Flexibilidade de programa | Flexibilidade de processo | Flexibilidade de operações | Flexibilidade de competência | Flexibilidade de fornecimento | Flexibilidade reativa | Flexibilidade proativa | Flexibilidade de qualidade | Flexibilidade de sequência | Flexibilidade de troca |
| Teich e Claus (2017) | ○ | ○ | | | | | | | | | | | | | | |
| Mishra, Pundir e Ganapathy (2017) | | | ○ | ○ | ○ | | | | | | ○ | | | ○ | ○ | |
| Pérez, Bedia e Fernández (2016) | | | | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | | | | | | | | |
| Alavi (2016) | | | | ○ | | | | | ○ | | | | | | | |
| Kumar e Sharma (2015) | | | | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | | | | | | | ○ |
| Wanstrom (2014) | | | | | | ○ | | | | | | | | | | |
| Rathje, Defforin e Anand (2014) | | | | ○ | | | | | | ● | | | | | | |
| Singholi, Ali e Sharma (2013) | | | | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | | | ○ | | | | | |
| Kim, Suresh e Hillmer (2013) | | ○ | | ○ | | ○ | ○ | ○ | ○ | | | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| Seebacher e Winkler (2013) | ○ | | ○ | ○ | | ○ | ○ | ○ | ○ | | | | | | | ○ |
| Idris, Rahman e Hassan (2013) | | | ○ | ○ | | ○ | ○ | ○ | ○ | | | | | | | |
| Chang (2012) | | | | ○ | | ○ | ○ | ○ | ○ | | | | | | | |
| Ali e Wadhwa (2010) | | | | | | ○ | ○ | ○ | ○ | | | | | | | |
| Rogers, Olja e White (2011) | | | | | | ● | | | | | ● | | | | | |
| Koste e Malhotra (1999) | ○ | ○ | ● | ● | | | | | ● | | | ○ | ○ | | | |
| Suarez, Cusumano e Fine (1996) | | | | ○ | ○ | ○ | | | | | | | | | | |
| Upton (1994) | ● | ● | ● | ● | | | | ○ | ○ | | | | | | | |
| Gerwin (1993) | | | | | | | | | | | | ● | ● | | | ● |
| Chen, Calantone e Chung (1992) | | | | ● | ● | ● | ● | ● | ● | | | | | | | |
| Sethi e Sethi (1990) | | | | ● | ● | ● | ● | ● | ● | | | | | | | |
| Gupta e Goyal (1989) | | | ○ | ○ | | ○ | | ○ | ○ | | | | | | | |
| Son e Park (1987) | | | | ● | | | ● | ● | | | | | | | | |
| Slack (1987) | | | | | ○ | | | | | | | | | | | |
| Gerwin (1987) | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Browne et al. (1984) | | | | | | ● | | ● | ● | | | | | | ● | |
| Slack (1983) | | | | | ● | | | | | | | | | ● | | |
| ○ - Autor apenas listou o tipo de flexibilidade ou utilizou alguma referência bibliográfica. ● - Autor definiu o tipo de flexibilidade. | | | | | | | | | | | | | | | | |

○ - Autor apenas listou o tipo de flexibilidade ou utilizou alguma referência bibliográfica.
 ● - Autor definiu o tipo de flexibilidade.

Fonte: O autor (2019).

Suarez, Cusumano e Fine (1996), ao observar a literatura, já verificaram que o uso de nomes diferentes para se referir aos mesmos tipos de flexibilidade causou uma falta de clareza nas taxonomias propostas. Os autores então propõem a divisão dos tipos de flexibilidade entre “primeira-ordem” e “baixa-ordem”, que é uma classificação semelhante à flexibilidade externa e interna, respectivamente, proposta por Upton (1994).

Koste e Malhotra (1999) definiram quatro elementos da flexibilidade, principalmente a partir do trabalho de Upton (1994), e realizaram um mapeamento exaustivo da literatura para identificar esses quatro elementos (quantidade da amplitude, heterogeneidade da amplitude, mobilidade e uniformidade) em dez tipos de flexibilidade comumente citados em trabalhos prévios. Após essa etapa, os autores utilizaram as conclusões obtidas para propor novas definições mais completas para os tipos de flexibilidade analisados.

A partir do novo milênio apenas duas grandes contribuições na identificação de novos tipos de flexibilidade foram observadas entre os artigos coletados. Primeiramente, Rogers, Ojha e White (2011) definiram a flexibilidade de fornecimento, além de referenciar cinco outros tipos de flexibilidade já mencionadas por outros autores. Por fim, Rathje, Deflorin e Anand (2014) propuseram uma flexibilidade de competência, através da extensão do conceito da flexibilidade de trabalho. Os outros artigos coletados não apresentaram novas definições ou classificações para a flexibilidade, utilizando apenas referências a trabalhos prévios. Esse fenômeno indica que a natureza da pesquisa sobre flexibilidade não mudou, necessariamente, a partir da introdução dos conceitos da quarta revolução industrial.

Algumas divergências entre os autores são observadas para as definições de flexibilidade de *mix*, principalmente quanto a diferentes entendimentos referentes à natureza multidimensional da flexibilidade (amplitude, mobilidade, uniformidade). A definição de flexibilidade de *mix* oferecida por Gerwin (1987) diz respeito à habilidade do sistema produtivo em fabricar múltiplos produtos ao mesmo tempo, o que se limita à dimensão amplitude. Já Slack (1983) e Che, Calantone e Chung (1992) defendem que a flexibilidade de *mix* se refere a habilidade do sistema em alterar o *mix* de produtos fabricados, somente se limitando à dimensão mobilidade. Gerwin (1993), em uma atualização de seu trabalho anterior, é o único autor a mencionar um aspecto de penalização temporal para a troca entre produtos do *mix*, porém não menciona a habilidade do sistema em alterar o *mix* dos produtos fabricados, como os 2 autores

anteriores. Koste e Malhotra (1999) identificam a flexibilidade de *mix* de forma multidimensional, como o número e a heterogeneidade dos produtos que podem ser fabricados (dimensão amplitude) sem penalidades ao desempenho (dimensão uniformidade). O autor, contudo, também não mencionou os aspectos de mobilidade levantados por Slack (1983) e Chen, Calantone e Chung (1992). Para este trabalho, a flexibilidade será classificada tanto quanto ao escopo (e.g. mix, produto, volume), bem como quanto às dimensões (amplitude, mobilidade, uniformidade), para maior clareza conceitual. A estruturação das classificações se encontra na seção 2.1.1.2.

Por fim, a definição de flexibilidade de produto oferecida por Son e Park (1987) – adaptabilidade de um sistema para alterar seu *mix* de produtos – seria mais convergente com as definições de flexibilidade de *mix*, em sua dimensão de mobilidade, visto que as definições de flexibilidade de produto oferecidas por todos os outros autores: Slack (1983), Browne et al. (1984), Sethi e Sethi (1990), Chen, Calantone e Chung (1992) e Koste e Malhotra (1999); dizem respeito especificamente à introdução de um novo produto no sistema de manufatura. Como principal resultado dessa primeira etapa da revisão de conteúdo, é possível observar no QUADRO 3 uma síntese de todas as definições fornecidas pelos autores analisados para os 31 tipos de flexibilidade encontrados.

QUADRO 3 – OS TIPOS DE FLEXIBILIDADE NA MANUFATURA

(continua)

| Dimensão de flexibilidade | Definição | Referência |
|------------------------------|---|--------------------------------|
| Flexibilidade de volume | Amplitude na qual o sistema produtivo pode variar sua produção, considerando o limite de capacidade operacional. | Slack (1983) |
| | Habilidade em operar um sistema de produção flexível lucrativamente em diferentes volumes de produção. | Browne et al. (1984) |
| | Facilidade em que alterações na quantidade de produção de um processo de manufatura podem ser alcançadas. | Gerwin (1987) |
| | Habilidade de um sistema de produção em operar com lucro em diferentes níveis de produção. | Sethi e Sethi (1990) |
| | Capacidade de um sistema de produção em operar com diferentes tamanhos de lotes ou volumes produtivos, no curto prazo, de maneira econômica. | Chen, Calantone e Chung (1992) |
| | Possibilidade de realizar aumentos e reduções no volume de produção. Possui um aspecto de amplitude quanto à quantidade de mudança possível, e um aspecto temporal quanto ao tempo necessário para a realização da mudança. | Gerwin (1993) |
| Flexibilidade de produto | Alcance de mudança e degrau de flutuação no nível de saída que o sistema pode acomodar sem grandes penalidades e alterações de desempenho. | Koste e Malhotra (1999) |
| | Habilidade em realizar troca para a produção de um ou mais novos produtos - de maneira rápida e econômica - para adaptação a novas realidades de mercado. | Browne et al. (1984) |
| | Adaptabilidade de um sistema de manufatura para alterar seu <i>mix</i> de produtos. | Son e Park (1987) |
| | Facilidade com a qual novas peças podem ser adicionadas ou substituídas no lugar de peças existentes. | Sethi e Sethi (1990) |
| | Capacidade de realizar troca para introdução de novos produtos e responder a pedidos de mudança de clientes. | Chen, Calantone e Chung (1992) |
| | Habilidade de fabricar um produto novo. | Slack (1983) |
| Flexibilidade de mix | Número e heterogeneidade de novos produtos que podem ser introduzidos para produção sem grandes penalidades ou alterações de desempenho. | Koste e Malhotra (1999) |
| | Habilidade de alterar o sistema produtivo para um novo <i>mix</i> de produtos dentro do período mínimo de planejamento da companhia. Alterar a amplitude de produtos feitos. | Slack (1983) |
| | Habilidade de um processo de manufatura em produzir um número de produtos diferentes no mesmo período de tempo. | Gerwin (1987) |
| | Capacidade de um sistema de produção em responder de forma rápida e econômica a alterações de <i>mix</i> no mercado. | Chen, Calantone e Chung (1992) |
| | Possibilidade de lidar com uma variedade de produtos devido a trocas rápidas. Possui um aspecto de amplitude quanto à variedade de produtos sendo fabricados, e um aspecto temporal quanto ao tempo de troca para a mudança de produto. | Gerwin (1993) |
| | Número e heterogeneidade dos produtos que podem ser produzidos sem grandes penalidades ou alterações de desempenho. | Koste e Malhotra (1999) |
| Flexibilidade de produção | Universo de peças que podem ser fabricadas por um sistema de produção flexível. | Browne et al. (1984) |
| | Universo de peças que o sistema de manufatura pode produzir sem necessidade de adição de equipamentos de alto custo. | Sethi e Sethi (1990) |
| Flexibilidade de modificação | Habilidade de um processo em fazer modificações funcionais em um produto, visando sua customização. | Gerwin (1987) |
| | Possibilidade de realizar pequenas modificações de projeto em um produto. Possui um aspecto de amplitude quanto à variedade de modificações possíveis, e um aspecto temporal quanto à velocidade em que a modificação é realizada. | Gerwin (1993) |
| | Número e heterogeneidade das modificações de produto que podem ser realizadas sem grandes penalidades ou alterações de desempenho. | Koste e Malhotra (1999) |
| | | |

QUADRO 3 – OS TIPOS DE FLEXIBILIDADE NA MANUFATURA

(continuação)

| Dimensão de flexibilidade | Definição | Referência |
|--|--|--------------------------------|
| Flexibilidade de amplitude | Capacidade de exibir uma maior amplitude de estados ou comportamentos, como por exemplo: fabricar uma maior variedade de produtos e com diferentes níveis de volume, qualidade e tempos de entrega. | Slack (1983) |
| | Habilidade em acomodar uma grande amplitude dentro da dimensão de mudança. Pode ser representada pelo número de posições viáveis dentro da amplitude, ou por alguma métrica da distância entre os pontos extremos da amplitude. | Upton (1994) |
| Flexibilidade de tempo | Capacidade em mudar de um estado para outro rapidamente. Essa flexibilidade pode levar a um aumento do custo de mudança de estado. | Slack (1983) |
| Flexibilidade de custo | Capacidade em mudar de um estado para outro com baixo custo. Essa flexibilidade pode levar a um aumento do tempo necessário para a mudança de estado. | Slack (1983) |
| Flexibilidade de curto prazo (operacional) | Habilidade de realizar alterações rapidamente: de um dia para outro, ou ao longo de um dia. | Upton (1994) |
| Flexibilidade de médio prazo (tática) | Habilidade de ocasionalmente mudar ou se adaptar, em horizontes de tempo de alguns meses, realizando alterações que demandam certo esforço e comprometimento. | Upton (1994) |
| Flexibilidade de longo prazo (estratégica) | Flexibilidade associada a grandes mudanças de longo prazo, que ocorrem com pouca frequência, onde é necessário um maior grau de comprometimento ou capital. | Upton (1994) |
| Flexibilidade de máquina (equipamento) | Facilidade em realizar as mudanças necessárias para a produção de um conjunto específico de peças. Está relacionada ao tempo de troca dos equipamentos para produção de novos itens, ou troca de equipamentos degradados. | Browne et al. (1984) |
| | Capacidade do equipamento em acomodar novos produtos ou variações de produtos existentes. | Son e Park (1987) |
| | Se refere aos vários tipos de operações que uma máquina pode realizar sem que um esforço proibitivo (i.e. tempo, custo) seja necessário para trocar de uma operação para a outra. | Sethi e Sethi (1990) |
| | Capacidade de uma máquina para realizar diferentes operações requeridas por um conjunto de peças. | Chen, Calantone e Chung (1992) |
| | Número e heterogeneidade das operações que uma máquina pode executar sem sofrer altas penalidades de transição ou grandes alterações de desempenho. | Koste e Malhotra (1999) |
| Flexibilidade de trabalho | Habilidade dos trabalhadores em desempenhar uma ampla gama de tarefas de produção de forma efetiva. | Chen, Calantone e Chung (1992) |
| | Número e heterogeneidade das tarefas que um operador pode executar sem sofrer altas penalidades de transição ou grandes alterações de desempenho. | Koste e Malhotra (1999) |
| Flexibilidade de (manuseio de) material | Habilidade em lidar com variações na composição e dimensões das peças processadas. Além disso, habilidade em lidar com diferentes substâncias para um ou mais componentes. | Gerwin (1987) |
| | Habilidade em mover tipos diferentes de peças de forma eficiente para posicionamento e processamento correto. | Sethi e Sethi (1990) |
| | Capacidade para transportar diferentes peças da área de carregamento para os centros de usinagem e áreas de descarregamento e armazenamento. | Chen, Calantone e Chung (1992) |
| | Habilidade em lidar com variações inesperadas nos insumos (entradas) do processo. Possui um aspecto de amplitude quanto ao número de variações suscetíveis a ajuste, e um aspecto temporal quanto ao tempo necessário de ajuste. | Gerwin (1993) |
| | Número de caminhos existentes entre centros de processamento e a heterogeneidade do material que pode ser transportado sem ocorrência de grandes penalidades ou alterações de desempenho. | Koste e Malhotra (1999) |

QUADRO 3 – OS TIPOS DE FLEXIBILIDADE NA MANUFATURA

(continuação)

| Dimensão de flexibilidade | Definição | Referência |
|---|--|--------------------------------|
| Flexibilidade de roteamento (re-roteamento) | Habilidade em lidar com quebras e continuar a produção. Para isso, ou existem diversas rotas possíveis para o processamento de uma peça, ou cada operação de processamento é feita por múltiplas máquinas. | Browne et al. (1984) |
| | Nível em que é possível modificar a sequência de operações por onde as peças fluem para lidar com incertezas quanto a quebras de máquina. | Gerwin (1987) |
| | Habilidade de um sistema em produzir peças por rotas alternativas. | Sethi e Sethi (1990) |
| | Capacidade de processar um conjunto de peças utilizando mais de uma rota. | Chen, Calantone e Chung (1992) |
| | Possibilidade de ajustar a sequência das máquinas por onde uma peça flui. Possui um aspecto de amplitude quanto à quantidade de peças e o nível possível de flexibilidade, e um aspecto temporal quanto ao tempo necessário de ajuste. | Gerwin (1993) |
| | Número de produtos que possuem rotas alternativas e extensão da variação entre as rotas que pode ser utilizada sem grandes penalidades ou alterações de desempenho. | Koste e Malhotra (1999) |
| Flexibilidade de mobilidade | Habilidade em proporcionar mobilidade dentro da dimensão de mudança, através de baixas penalizações (i.e. tempo, custo) para transições. | Upton (1994) |
| Flexibilidade de uniformidade | Capacidade de se manter o nível de desempenho constante independente da posição em que o sistema se encontra dentro da amplitude de alterações possíveis. | Upton (1994) |
| Flexibilidade interna | Estratégias e capacidades cujas naturezas não são diretamente relevantes para o mercado, exceto pelo fato de seus efeitos gerarem benefícios. | Upton (1994) |
| | Conjunto de capacidades internas. Foco interno: "o que podemos fazer". | |
| | Flexibilidades cujos efeitos competitivos são expressados por algum tipo de flexibilidade externa. | Suarez, Cusumano e Fine (1996) |
| Flexibilidade externa (mercado) (demanda) | Estratégias que proporcionam vantagem competitiva em um ambiente particular. Foco externo: "o que o cliente enxerga". | Upton (1994) |
| | Flexibilidades que afetam diretamente a posição da empresa no mercado, pois são percebidas diretamente pelos clientes. | Suarez, Cusumano e Fine (1996) |
| | Facilidade com a qual um sistema de manufatura pode se adaptar a um ambiente de mercado mutável. | Sethi e Sethi (1990) |
| | Adaptabilidade para alterações de demanda. | Son e Park (1987) |
| Flexibilidade de entrega | Habilidade do sistema produtivo em adiantar ou atrasar datas de entrega, através da aceleração ou retardamento da produção. | Slack (1983) |
| Flexibilidade de expansão | Capacidade de construir um sistema e expandi-lo facilmente de maneira modular quando necessário. | Browne et al. (1984) |
| | Facilidade com a qual um sistema de manufatura pode aumentar a sua capacidade e capacidade quando necessário. | Sethi e Sethi (1990) |
| | Capacidade de um sistema de produção em expandir suas instalações para lidar com aumentos de demanda no longo prazo. | Chen, Calantone e Chung (1992) |
| | Número e heterogeneidade de expansões que podem ser acomodadas sem grandes penalidades ou alterações de desempenho. | Koste e Malhotra (1999) |
| Flexibilidade de programa | Habilidade do sistema de manufatura em funcionar sem supervisão por um longo período de tempo. | Sethi e Sethi (1990) |
| | Capacidade de um sistema de produção em operar sem supervisão por certo período de tempo. | Chen, Calantone e Chung (1992) |
| Flexibilidade de processo | Habilidade em produzir um conjunto de peças diferentes, possivelmente com materiais diferentes, de diversas formas. | Browne et al. (1984) |
| | Adaptabilidade em relação a alterações no processamento das peças, como quebras e mudanças de planejamento. | Son e Park (1987) |
| | Conjunto de partes que o sistema consegue produzir sem a necessidade de grandes trocas (<i>setup</i>) | Sethi e Sethi (1990) |
| | Capacidade do sistema de produção em produzir um conjunto de peças que possivelmente possuem diferentes processos, materiais e sequências de operações. | Chen, Calantone e Chung (1992) |

QUADRO 3 – OS TIPOS DE FLEXIBILIDADE NA MANUFATURA

(conclusão)

| Dimensão de flexibilidade | Definição | Referência |
|-------------------------------|--|---------------------------------|
| Flexibilidade de operações | Habilidade em alterar a ordem das operações para a produção de uma peça, de acordo com as condições em que o sistema se encontra e respeitando restrições de precedência existentes entre as operações. | Browne et al. (1984) |
| | Habilidade de se produzir uma peça de diferentes formas (sequências de operações alternativas). | Sethi e Sethi (1990) |
| | Número de produtos que possuem planos alternativos de sequenciamento e heterogeneidade dos planos utilizados sem grandes penalidades ou alterações de desempenho. | Koste e Malhotra (1999) |
| Flexibilidade de competência | Variedade e heterogeneidade do conhecimento das pessoas em relação a uma tecnologia. Essa flexibilidade auxilia na adaptação da companhia a novos processos e tecnologias e sofre redução caso ocorra terceirização. | Rathje, Deflorin e Anand (2014) |
| Flexibilidade de fornecimento | Habilidade em reduzir os efeitos das incertezas do ambiente através da seleção de fornecedores que sejam capazes de responder a alterações solicitadas pelos clientes. | Rogers, Ojha e White (2011) |
| Flexibilidade reativa | Habilidade em responder de forma adaptativa a incertezas oriundas do ambiente externo. | Gerwin (1993) |
| Flexibilidade proativa | Habilidade da empresa em redefinir as incertezas do mercado por vontade própria, ao invés de reagir a incertezas provenientes do mercado. | Gerwin (1993) |
| Flexibilidade de qualidade | Habilidade em alterar o nível de qualidade dos produtos fabricados para atingir um patamar desejado. | Slack (1983) |
| Flexibilidade de sequência | Habilidade em alterar a ordem de alimentação dos diferentes tipos de peças no processo de manufatura para lidar com incertezas nas datas de entrega de insumos necessários para a produção. | Gerwin (1987) |
| Flexibilidade de troca | Habilidade de um processo em lidar com a adição ou subtração de produtos em seu <i>mix</i> ao longo do tempo. | Gerwin (1987) |
| | Habilidade de substituir um produto rapidamente. Possui um aspecto de amplitude quanto à variedade de mudanças de projeto que o sistema pode acomodar, e um aspecto temporal quanto ao tempo em que a substituição é implantada. | Gerwin (1993) |

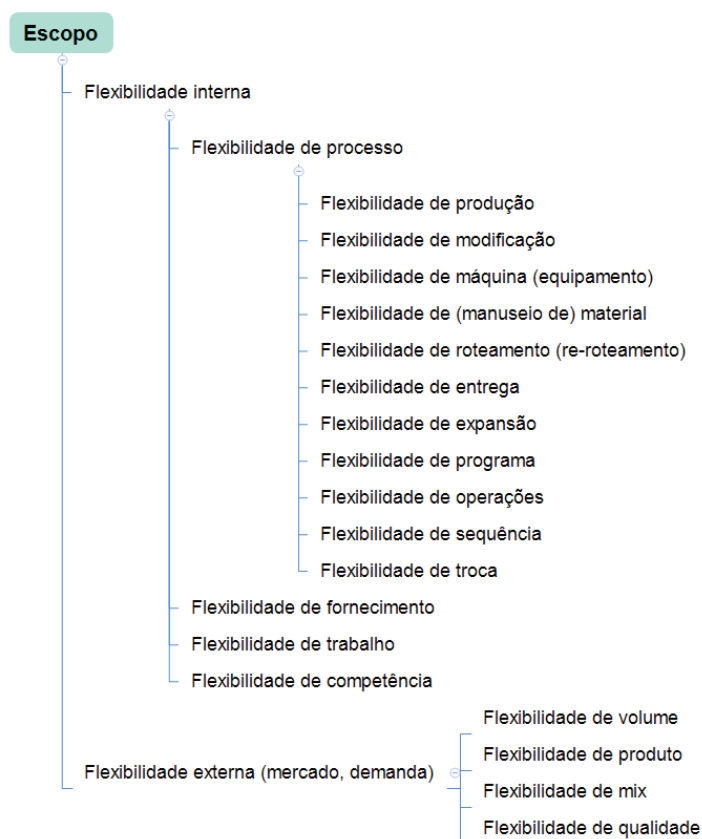
Fonte: O autor (2019).

2.1.2 Classificações taxonômicas da flexibilidade de manufatura

Os 31 tipos de flexibilidade foram divididos em 4 classificações que analisam diferentes aspectos, aqui chamados de: escopo, dimensão, prazo e abordagem. A metodologia de taxonomia utilizada para a formulação das classificações da RSL é apresentada no APÊNDICE 1.

A classificação quanto ao escopo busca repartir os tipos de flexibilidade em suas funções e funcionamentos básicos (FIGURA 6). A maior parte das contribuições clássicas advindas dos autores dos anos 80 pertence a essa classificação, conforme se verifica em Gerwin (1987), Browne et al. (1984) e Son e Park (1987), uma vez que esse período foi marcado por uma etapa mais exploratória do estudo da flexibilidade dentro da manufatura.

FIGURA 6 – TIPOS DE FLEXIBILIDADE QUANTO AO ESCOPO



Fonte: O autor (2019).

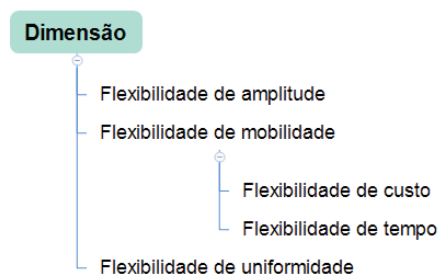
No topo da hierarquia de classificação taxonômica se encontram a flexibilidade externa e interna. A primeira diz respeito aos atributos necessários para se atingir vantagens competitivas no mercado, e é percebida diretamente pelo cliente. A segunda, de forma complementar, indica as estratégias internas adotadas pelas indústrias para operacionalização da flexibilidade requerida pelo ambiente externo. Apesar de não ser diretamente relevante ao cliente, são seus efeitos que possibilitam o alcance de flexibilidade externa (UPTON, 1994; SUAREZ, CUSUMANO e FINE, 1996).

A flexibilidade interna possui ainda mais 2 níveis hierárquicos adicionais. No primeiro, se estabelece uma diferença entre as flexibilidades que são capacidades do sistema produtivo (flexibilidade de processo) e flexibilidades internas originadas por outros recursos ligados à empresa, como no caso daquelas que são geradas por recursos humanos (flexibilidade de trabalho e competência) ou fornecedores (flexibilidade de fornecimento). No último nível, a flexibilidade de processo é dividida entre todas as alternativas de flexibilidade referentes ao processo produtivo. Já a

flexibilidade externa possui apenas um nível hierárquico adicional, que determina qual vantagem competitiva é buscada pela empresa junto ao mercado.

A classificação quanto a dimensão incorpora as principais contribuições de Slack (1983) e Upton (1994) e pode ser observada na FIGURA 7.

FIGURA 7 – TIPOS DE FLEXIBILIDADE QUANTO À DIMENSÃO

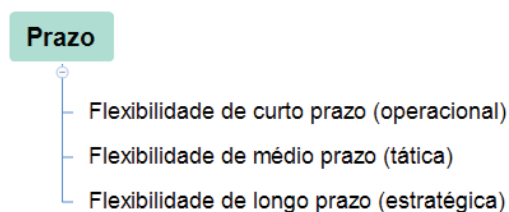


Fonte: O autor (2019).

No primeiro nível hierárquico se encontram as três dimensões propostas por Upton (1994): amplitude, mobilidade e uniformidade. A diferença entre amplitude e mobilidade fornece maior clareza para a compreensão de tipos de flexibilidades pertencentes a taxonomia anterior, como produto, *mix* e volume. A amplitude caracteriza um sistema produtivo flexível por ter capacidade de operar sob diferentes formas simultaneamente. Já a mobilidade caracteriza um sistema produtivo flexível por ter capacidade de alterar a forma em que opera com baixa penalidade. As duas penalidades propostas por Slack (1983) – tempo e custo – se encontram em um nível hierárquico abaixo da flexibilidade de mobilidade.

A classificação quanto ao prazo também tem base no trabalho de Upton (1994), no qual o autor estabeleceu diferentes classificações quanto à frequência em que mudanças podem ser realizadas. Mudanças que podem ser operacionalizadas em dias ou ao longo de um dia são consideradas de curto prazo ou operacionais; mudanças ocasionais, que demandam certo esforço e ocorrem com frequência mensal são consideradas de médio prazo ou táticas; finalmente, mudanças de longo prazo, associadas a um maior grau de comprometimento ou capital são consideradas de longo prazo ou estratégicas. A classificação pode ser observada na FIGURA 8.

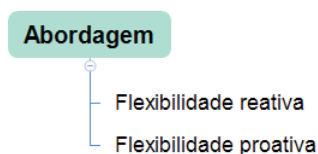
FIGURA 8 – TIPOS DE FLEXIBILIDADE QUANTO AO PRAZO



Fonte: O autor (2019).

A classificação quanto a abordagem surge a partir do importante trabalho de Gerwin (1993) e está apresentada na FIGURA 9. O autor divide a abordagem de flexibilidade adotada por uma empresa em dois grupos. De um lado, a empresa reativa busca ser flexível ao se adaptar às incertezas provenientes do mercado. De outro lado, a empresa proativa tem habilidade em redefinir as incertezas do mercado (GERWIN, 1993).

FIGURA 9 – TIPOS DE FLEXIBILIDADE QUANTO À ABORDAGEM



Fonte: O autor (2019).

2.2 INDÚSTRIA 4.0 E A FLEXIBILIDADE

Entre 1760 e 1840 identifica-se a primeira revolução industrial, acarretada pela construção de rodovias e criação da máquina a vapor. Entre o final do século XIX e início do século XX, com o advento da eletricidade e a criação da linha de montagem, se deu a segunda revolução industrial, possibilitando a produção em massa (SCHWAB, 2016). A terceira revolução industrial, na sequência, ocorreu por volta dos anos 70 e indica a utilização de eletrônicos e da tecnologia da informação para a obtenção de maior automação nos processos de manufatura (ACATECH, 2013). Nos dias de hoje, por fim, a quarta revolução industrial começa a se configurar, caracterizada pela introdução na indústria dos sistemas SFC.

É possível definir de forma mais técnica os SFC como sendo sistemas inteligentes, que consistem em *hardware*, *software* (tanto componentes físicos quanto

computacionais), que estão integrados e em constante interação para controlar o estado do mundo em suas voltas (COLOMBO et al., 2017).

O desenvolvimento do projeto Indústria 4.0 pelo governo alemão é um exemplo de como a quarta revolução industrial se manifesta em projetos governamentais pelo mundo. Por ser um dos primeiros e mais bem estruturados movimentos dentro desse contexto, o projeto se tornou mais do que uma iniciativa exclusiva do governo alemão. Diferentes modelos têm sido propostos por bancos, empresas de consultoria e outras instituições da sociedade, com intuito de identificar quais são seus princípios e tecnologias, como pode ser observado em DB (2014), Botha e Theron (2016) e Scalabre (2019). Recentemente, o tema também passou a ser pesquisado dentro da academia. Apesar do número reduzido de publicações, revisões já podem ser identificadas em Lu (2017) e Liao et al. (2017).

No sumário executivo do já citado documento formulado pela ACATECH para a apresentação da Indústria 4.0, ao se referir às características da fábrica inteligente, a seguinte frase é colocada:

“As fábricas inteligentes permitem que os requisitos individuais dos clientes sejam atendidos e significa que mesmo itens únicos podem ser fabricados lucrativamente. Na *Industrie 4.0*, os processos dinâmicos de negócios e engenharia permitem mudanças de última hora na produção e oferecem a capacidade de responder de forma flexível a interrupções e falhas em nome de fornecedores, por exemplo.” (ACATECH, 2013).

Fica evidente a grande importância da flexibilidade dentro do projeto Indústria 4.0. Tendo como base os tipos de flexibilidade e estruturas de classificação taxonômicas propostas na seção 2.1.1, é possível melhor compreender de que forma essa flexibilidade se estende aos sistemas de produção.

Quanto à abordagem, a Indústria 4.0 se fundamenta em uma perspectiva de orientação ao cliente, em que requisitos individuais devem ser atendidos (ACATECH, 2013). Lasi (2014) caracteriza o fenômeno como uma mudança de um mercado dominado pelo vendedor para um mercado dominado pelo comprador, onde este último define as condições do comércio. Dentro da classificação apresentada, esse

ambiente se caracteriza como flexibilidade reativa (habilidade em responder de forma adaptativa a incertezas do mercado).

Já quanto ao prazo, se observa um foco na flexibilidade de curto prazo. Lee, Kao e Yang (2014) colocam que os desafios industriais no contexto da Indústria 4.0 são relacionados à rápida tomada de decisão para mudança. Além disso, os sistemas produtivos devem se reconfigurar em tempo real para atender à flexibilidades externas, mudanças de última hora na produção ou resolução de problemas prontamente (ACATECH, 2013; LEE, KAO e YANG, 2014; RADZIOWON et al., 2014)

Para avaliar a flexibilidade quanto ao escopo e dimensão, foram analisados artigos e documentos oficiais relacionados ao projeto.

Uma das principais características da Indústria 4.0 são as integrações vertical e de engenharia ponta-a-ponta. A integração vertical pode ser definida como a comunicação dos diferentes sistemas hierárquicos de uma mesma fábrica para a criação de sistemas de manufatura flexíveis e reconfiguráveis. A partir dessa integração, máquinas inteligentes formam um sistema organizado que pode ser dinamicamente reconfigurado para se adaptar a diferentes tipos de produtos (WANG et al., 2016). As reconfigurações ocorrem orientadas por um conjunto de regras decisórias que definem uma estrutura de sistema de manufatura específica para cada situação (ACATECH, 2013). Um esquema visual para integração vertical pode ser observado na FIGURA 10.

FIGURA 10 – INTEGRAÇÕES VERTICAL



Fonte: Adaptado de Siemens (2015).

A integração vertical tem maior foco nos aspectos de flexibilidade interna, ou seja, de que forma o sistema produtivo se torna flexível. A reconfiguração dinâmica de máquinas indica flexibilidade de máquina na dimensão de mobilidade. A aparição da dimensão mobilidade no estudo da flexibilidade da Indústria 4.0 tem um foco

conjunto em tempo e custo. Reconfigurações do sistema de manufatura a partir de regras decisórias indicam flexibilidade de roteamento na dimensão mobilidade. Por fim, do ponto de vista da flexibilidade externa é colocado que a integração vertical visa a possibilitar adaptação a diferentes tipos de produtos. Nesse sentido, pode ser identificada flexibilidade de produto nas dimensões de amplitude e mobilidade, no que diz respeito à velocidade para a introdução de um produto inédito no sistema produtivo, bem como sua heterogeneidade em relação aos produtos já fabricados. Por outro lado, também pode ser identificada flexibilidade de *mix* nas dimensões de amplitude e mobilidade, no que diz respeito ao número e heterogeneidade dos produtos que podem ser manufaturados ao mesmo tempo, além da velocidade para o sistema se adequar a um novo *mix* sem aumento inviável dos custos.

Por sua vez, a integração de engenharia ponta-a-ponta representa, através de sistemas de tecnologia da informação, a ligação de todas as diferentes etapas da criação de um produto (e.g. desenvolvimento do produto, projeto do sistema de produção, produção), com o objetivo de possibilitar a sua customização (WANG et al., 2016; ACATECH, 2013). Um esquema visual dessa integração pode ser observado na FIGURA 11.

FIGURA 11 – INTEGRAÇÃO ENGENHARIA PONTA-A-PONTA



Fonte: Adaptado de Siemens (2015).

A integração de engenharia somente salienta um aspecto externo de flexibilidade, o qual consiste na mesma classificação apresentada acima. Verifica-se flexibilidade de produto e de *mix*, tanto na dimensão amplitude quanto mobilidade.

Wang et al. (2016) descrevem as características de uma fábrica inteligente no contexto da Indústria 4.0. O autor argumenta que nessa fábrica as máquinas são capazes de auto reconfiguração para se adaptar a variações de tipos de produtos. Os arranjos físicos devem permitir múltiplas rotas de produção. Máquinas defeituosas não

afetam o sistema, devido a redundâncias de maquinário. Diversos recursos de diferentes tipos devem coexistir para produzir múltiplos tipos de produtos em pequenos lotes. Nesse caso, identifica-se flexibilidade de máquina na dimensão mobilidade (reconfiguração); além de flexibilidade de roteamento na dimensão amplitude (possibilidade de múltiplas rotas). As flexibilidades internas aparecem relacionadas à flexibilidade externa do tipo produto e dimensão amplitude e mobilidade (variações de tipos de produto), a qual resulta em flexibilidade de *mix* e dimensão amplitude e mobilidade (múltiplos tipos de produtos em pequenos lotes).

No protótipo de fábrica inteligente do Centro de Pesquisa Alemão para Inteligência Artificial, a empresa química BASF SE produz shampoos e sabonetes líquidos de maneira customizada. Quando um pedido é recebido virtualmente, o recipiente vazio do produto é capaz de comunicar às máquinas do processo produtivo todas as informações específicas requeridas pelo cliente (e.g. fragrância, composição) (WANG et al., 2016). Nesse caso, mais uma vez, observa-se flexibilidade de máquina nas dimensões amplitude e mobilidade para atendimento de um requisito de flexibilidade externa dos tipos produto e *mix* nas dimensão mobilidade e amplitude.

Por fim, no documento da ACATECH é colocado que a Indústria 4.0 vai gerar linhas de produção dinâmicas com múltiplas possibilidades de rotas para possibilitar a produção de itens com variações individuais para cada cliente (ACATECH, 2013). Este é um exemplo do uso de flexibilidade interna de roteamento e dimensão mobilidade para atendimento de flexibilidade externa dos tipos produto e *mix*, nas dimensões amplitude e mobilidade.

As propostas de diferentes tipos de flexibilidade interna observadas nesses documentos não auxiliam no desenvolvimento deste trabalho, visto que o estudo deve ser conduzido especificamente em torno dos sistemas de produção puxados, os quais já possuem suas características de flexibilidade interna definidas. São as flexibilidades externas, que representam as vantagens competitivas buscadas pela Indústria 4.0, que devem ser exploradas. Nesse sentido, os trabalhos caracterizam a flexibilidade atrelada à Indústria 4.0 de forma próxima ao conceito de flexibilidade de *mix* de Koste e Malhotra (1999), onde os sistemas de produção são afetados quanto à quantidade de tipos de produtos manufaturados, bem como quanto à heterogeneidade entre os tipos de produtos manufaturados.

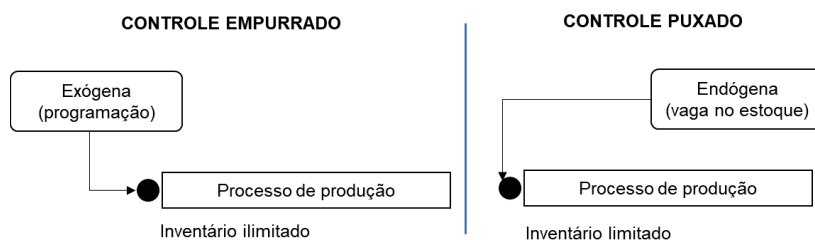
2.3 SISTEMAS DE CONTROLE DE PRODUÇÃO PUXADO

Foram propostas 3 estratégias originais de SCPP na literatura, as quais são descritas na seção 2.3.1. Estratégias híbridas, mais refinadas, são apresentadas na seção 2.3.2. Por fim, trabalhos correlatos que tratam dos desafios dos SCPP em ambientes de flexibilidade de manufatura são revisados na seção 2.3.3.

2.3.1 Estratégias elementares de controle puxado

Uma estratégia de controle de produção se refere à forma como as ordens de produção são lançadas no processo. Esmailian, Behdad e Wang (2016) classificam essas estratégias em 3 diferentes alternativas: controle empurrado, controle puxado e controle híbrido. De forma simples, o controle empurrado programa a produção com base em informações exógenas (programação), enquanto o controle puxado autoriza a produção com base em informações endógenas (HOPP e SPEARMAN, 2013). Um esquema visual dessa diferença é apresentado na FIGURA 12.

FIGURA 12 – CONTROLE DE PRODUÇÃO EMPURRADO E PUXADO

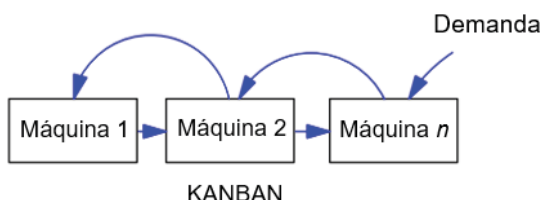


Fonte: Adaptado de Hopp e Spearman (2013).

Em seu formato mais famoso, o controle puxado consiste nas estações de trabalho puxarem estoque de materiais das operações anteriores, conforme necessário para completar suas tarefas atuais. A produção é então conduzida para reabastecer o estoque que acabara de ser retirado, o qual é indicado por qualquer tipo de sinal ou cartão (SPEARMAN e ZAZANIS, 1992). Este protocolo específico é conhecido como sistema de controle Kanban (SCK), e foi desenvolvido pela Toyota para possibilitar o fluxo de peças em um sistema *just-in-time* (GERAGHTY e HEAVEY, 2005). Smalley (2004), no contexto da manufatura enxuta, define uma estratégia semelhante, exclusiva para ambientes *make-to-stock*, nomeada “puxada por reabastecimento”, a qual consiste em reter unidades finalizadas de todos os tipos de

produtos e desencadear a produção quando há retiradas por parte dos clientes. Um esquema do funcionamento básico da estratégia de Kanban é apresentado na FIGURA 13.

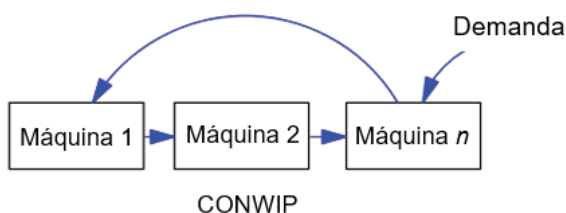
FIGURA 13 – SISTEMA DE CONTROLE KANBAN



Fonte: Adaptado de Esmaelian, Behdad e Wang (2016).

Outra forma de executar o controle puxado ocorre através da estratégia *constant work-in-process* (CONWIP), que pode ser visualizada na FIGURA 14. Em vez de puxar a produção em cada estação de trabalho, o controle CONWIP puxa apenas na frente da linha, enquanto os outros processos operam de maneira semelhante à estratégia de controle empurrado (GERAGHTY e HEAVEY, 2004; SPEARMAN e ZAZANIS, 1992). Para a operação do CONWIP, um limite superior no nível de estoque do sistema de produção é determinado. Quando este nível é atingido, estoques não podem ser gerados no sistema até que um evento de demanda ocorra, removendo inventário da linha (GERAGHTY e HEAVEY, 2005).

FIGURA 14 – ESTRATÉGIA CONWIP

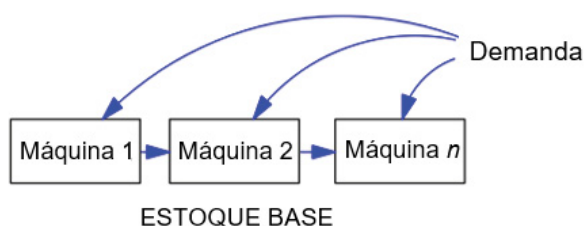


Fonte: Adaptado de Esmaelian, Behdad e Wang (2016).

Por sua vez, na estratégia de controle por estoque base (ECEB) (FIGURA 15) os pontos de estoque a cada estágio são iniciados em níveis pré-determinados. Quando ocorre demanda no sistema produtivo, cartões de demanda são enviados simultaneamente a todos os estágios do processo. Cada cartão de demanda é então designado a uma peça disponível no estoque de entrada de cada um dos estágios

para autorização da produção (os cartões são destruídos após o início da produção) (GERATHY e HEAVEY, 2005). O mecanismo do ECEB limita a quantidade de inventário entre cada estágio do processo, além de oferecer rápida resposta a eventos de demanda. Contudo, não há coordenação da produção entre estágios, nem limite para o número de peças que podem desencadear a produção (GERATHY e HEAVEY, 2005; KHOJASTEH e SATO, 2015).

FIGURA 15 – ESTRATÉGIA ESTOQUE BASE



Fonte: Adaptado de Esmaelian, Behdad e Wang (2016).

2.3.2 Estratégias híbridas de controle puxado

Alguns autores apresentam propostas de modelos híbridos a partir das 3 estratégias apresentadas na seção anterior para a elaboração de sistemas mais refinados. Buzacott (1989) propôs um Sistema de Controle Kanban Generalizado (SCKG), que é capaz de generalizar todas as 3 estratégias básicas. O sistema opera com o ajuste de 2 parâmetros para cada estágio (controle de inventário e meta de produção). Como uma versão híbrida de SCK e ECEB, Dallery e Liberopoulos (2000) desenvolveram o Sistema de Controle Kanban Estendido (SCKE). Dentro da lógica de operação mais simplificada do SCK, o número de Kanbans executa ambos os papéis de autorizar a produção de novas peças, bem como determinar o nível de estoque base de peças acabadas em um estágio produtivo. No SCKE, estas duas funções são claramente separadas e sintonizadas através de dois parâmetros diferentes em cada estágio. Bonvik et al. (1997) propuseram uma estratégia híbrida Kanban CONWIP (HK-CONWIP) e, com base nela, Onyeocha e Geraghty (2012) desenvolveram uma estratégia híbrida estoque base Kanban CONWIP (BK-CONWIP), que opera com dois parâmetros para cada estágio, exceto o último (Kanbans disponíveis e níveis de estoque base) e 1 parâmetro para limitar o inventário de todo o sistema.

Para adaptar os SCPP a ambientes de múltiplos produtos, as estratégias que têm separação clara entre fluxo de informações de demanda e cartões de autorização de produção (por exemplo, SCKG, SCKE, BK-CONWIP) podem operar com uma de duas políticas de cartões (ONYEOCHA e GERAGHTY, 2012): Política de Distribuição de Kanban Compartilhada (PDK-C), onde os cartões podem ser utilizados para autorizar a produção de qualquer tipo de peça disponível, ou Política de Distribuição de Kanban Dedicada (PDK-D), onde cada tipo de peça possui um cartão correspondente para autorizar a produção (AL-HAWARI, QASEM e SMADI, 2018).

2.3.3 Controle puxado em ambientes de flexibilidade

Alguns trabalhos têm abordado os desafios do controle puxado em ambientes expostos à flexibilidade. Piplani e Ang (2017) apresentaram procedimentos para a otimização de políticas ECEB, SCK e SCKE em sistemas de múltiplos produtos, bem como conduziram uma simulação para comparar seus desempenhos com base em uma métrica de custo. Os autores concluíram que o SCKE supera outros sistemas, obtendo um desempenho semelhante tanto com o uso de PDK-C quanto PDK-D.

Onyeocha, Khoury e Geraghty (2015) avaliaram o efeito da variabilidade da demanda nas estratégias SCKG, SCKE e BK-CONWIP, inseridas em um sistema de manufatura de múltiplos produtos. Os autores concluíram que o BK-CONWIP obtém o melhor desempenho tanto em nível de inventário (atendendo a um critério de nível de serviço), quanto em porcentagem média de entrega no prazo. Contrariamente, o SCKG obteve o pior desempenho para os mesmos indicadores. Além disso, os autores observaram que a política de cartões PDK-C requer um nível menor de estoque base do que a política PDK-D para obter um desempenho semelhante, além de ser capaz de responder a variações de demanda de maneira mais rápida.

Onyeocha (2015) estudou o efeito de diferentes composições de *mix* entre 4 produtos (baseadas em 4 conjuntos de dados de demanda) nos sistemas SCKG, SCKE e BK-CONWIP, por meio de experimentos de simulação. O autor analisou o desempenho dos sistemas com base no valor médio de inventário do sistema, nível de serviço e *backlog*. O BK-CONWIP com política de cartões compartilhada obteve o melhor desempenho, enquanto o SCKG com política de cartões dedicada obteve o pior desempenho.

3 MÉTODO

“É hora de levar a causalidade a sério. Nós todos sabemos que a correlação não estabelece causalidade. Já é hora de fazermos algo sobre isso. Constantemente recebemos manuscritos - baseados em pesquisas transversais em particular - onde os autores fazem afirmações causais. Já não enviamos para o processo de revisão manuscritos que interpretam sem críticas uma correlação transversal de X e Y como suporte de uma afirmação causal, ou então, de que a variância de X está impulsionando a variância de Y.” (GUIDE JR e KETOKIVI, 2015).

Esta passagem do editorial do prestigiado *Journal of Operations Management* ilustra o direcionamento tomado pelos autores na concepção de uma abordagem metodológica rigorosa para este trabalho, pautada pelo propósito de eliminar fatores de ruído e qualquer tipo de viés na análise dos resultados.

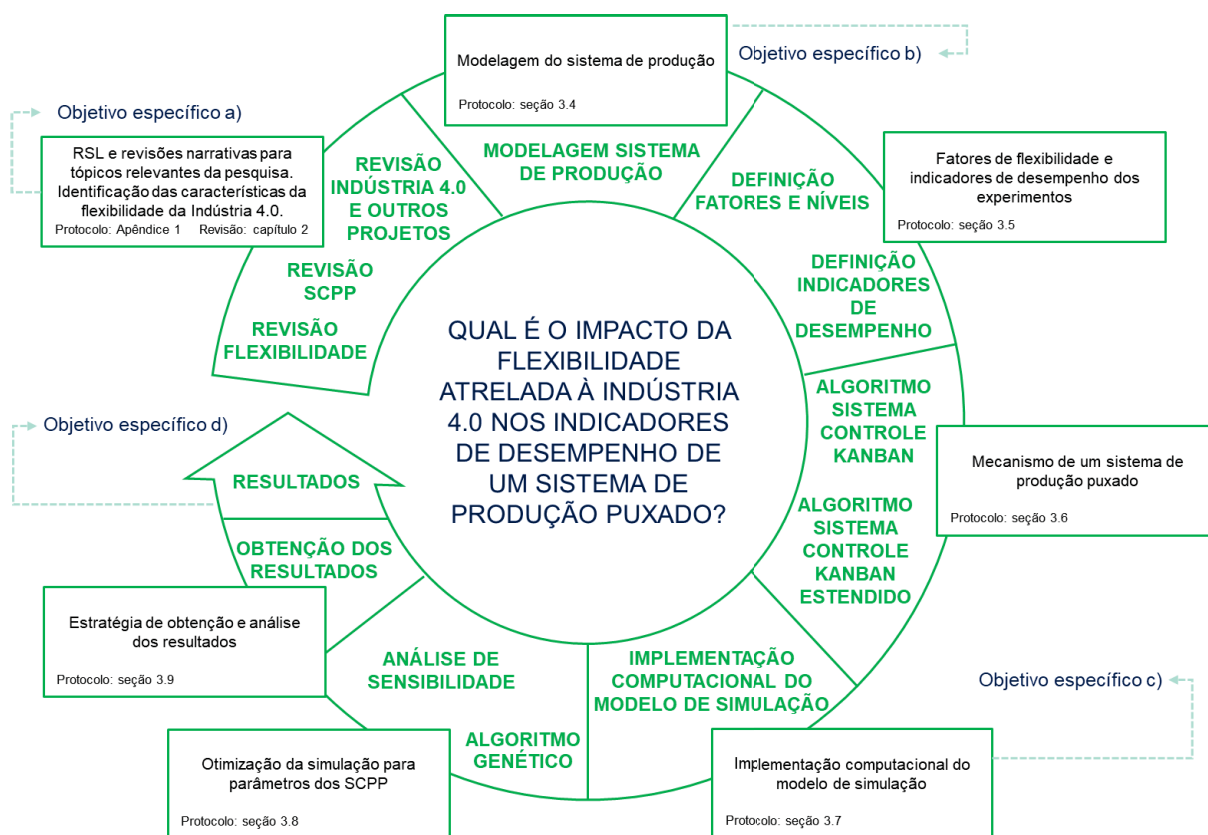
A geração virtual de dados para simulação possui algumas vantagens quando comparada à execução de experimentos em sistemas de produção reais, entre elas: a possibilidade de controlar – a partir de distribuições de probabilidade e controle de geração de dados aleatórios – fatores que no mundo real são incontrolláveis (LAW, 2014). Utilizando como base de análise um modelo simulado de sistema de produção, é possível inferir o efeito da flexibilidade a partir de uma abordagem experimental, onde os fatores de flexibilidade são explorados em um ambiente privado de ruído e todos os efeitos de variabilidade necessários para a verossimilhança da análise podem ser rastreados às distribuições de probabilidade definidas pelos autores. A utilização de replicações e intervalos de confiança permitem o julgamento da significância estatística dos efeitos de cada fator experimental. Ainda, estratégias podem ser criadas para a eliminação de vieses que interfiram na relação causal entre os fatores de flexibilidade e os indicadores de resultado. Especificamente, 2 formas de viés foram investigadas no contexto deste trabalho: o viés decorrente de alterações no índice de utilização de capacidade do sistema de produção, o que pode resultar em interferências na interpretação de estudos acerca da flexibilidade de *mix*; e o viés

decorrente da falta de robustez do método de otimização utilizado para encontrar os parâmetros de cada SCPP estudado.

3.1 ETAPAS DA PESQUISA

O detalhamento das etapas conduzidas na pesquisa pode ser visualizado na FIGURA 16.

FIGURA 16 – ETAPAS DA PESQUISA



FONTE: O autor (2019).

A etapa 1 da pesquisa compreende a execução de uma revisão de literatura, apresentada no capítulo 2. Métodos de RSL e classificação taxonômica foram utilizados para a identificação dos diferentes tipos de flexibilidade de manufatura. O protocolo utilizado para realização da RSL e classificação taxonômica se encontra detalhado no APÊNDICE 1. Já para os outros tópicos revisados, *i.e.*, Indústria 4.0, outros projetos da quarta revolução industrial, flexibilidade associada à Indústria 4.0 e SCPP, foi realizada apenas revisão narrativa. Esta etapa atende ao objetivo específico a) ao identificar as características da flexibilidade atrelada à Indústria 4.0.

A etapa 2 da pesquisa compreende a modelagem conceitual do sistema de produção sobre o qual são implementados os SCPP, associada ao objetivo específico b). A descrição do sistema se encontra na seção 3.4.

A etapa 3 da pesquisa consiste na descrição dos fatores de flexibilidade (quantidade de tipos de produtos e heterogeneidade de tempo de processamento entre os tipos de produtos) e na definição dos indicadores de desempenho dos experimentos (nível de serviço e estoque médio). A estratégia utilizada para eliminação do viés decorrente de alterações no índice de utilização da capacidade também é abordada em detalhe. Esta etapa se encontra na seção 3.5.

A etapa 4 da pesquisa consiste no desenvolvimento de algoritmos que simulem os mecanismos de funcionamento dos SCPP estudados: SCK, SCKE-D e SCKE SCKE-C, a partir do sistema de produção modelado. Esses mecanismos de funcionamento são abordados na seção 3.6.

A etapa 5 da pesquisa compreende a implementação computacional de um modelo de simulação que receba os parâmetros específicos de um cenário experimental (níveis dos fatores de flexibilidade, tipo de SCPP e seus parâmetros iniciais) e retorne os indicadores de desempenho resultantes para este cenário (nível de serviço e nível de estoque). O protocolo para esta etapa é apresentado na seção 3.7 e corresponde ao alcance do objetivo específico c).

A etapa 6 da pesquisa consiste na elaboração de um algoritmo de otimização de simulação, que busque a melhor configuração para os parâmetros dos SCPP estudados. Para cada um dos cenários experimentais, a otimização busca a minimização dos estoques para o alcance de um nível de serviço mínimo de 95%. O algoritmo é descrito na seção 3.8.

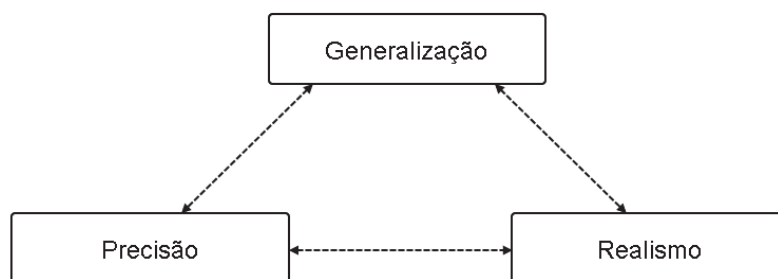
Por fim, a etapa 7 da pesquisa compreende a estratégia definida para a realização de todos os experimentos, obtenção e análise dos resultados para o alcance do objetivo específico d). O procedimento desta etapa se encontra na seção 3.9 e conclui o protocolo de pesquisa deste trabalho.

Após esta apresentação das etapas de pesquisa, uma discussão sobre os limites da abordagem metodológica é conduzida na seção 3.2. A classificação formal da metodologia de pesquisa é apresentada na seção 3.3. Cada etapa de pesquisa é detalhada entre as seções 3.4 e 3.9.

3.2 OS LIMITES DO MÉTODO

Ao argumentar sobre a impossibilidade do desenvolvimento de uma metodologia de pesquisa perfeita no âmbito da gestão de operações, Klassen e Menor (2007) apresentam o conceito do “dilema dos 3 chifres” (FIGURA 17), *i.e.*, a escolha de uma estratégia metodológica requer a compensação entre as capacidades de: 1) generalização dos resultados; 2) precisão na mensuração e controle das variáveis do estudo; 3) realismo do contexto da pesquisa. Os autores trazem como exemplo as descobertas resultantes de estudos de campo rigorosos, onde um alto nível de realismo é obtido, porém de forma geral com um alto custo na precisão das mensurações e capacidade de generalização das análises.

FIGURA 17 – O DILEMA DOS 3 CHIFRES

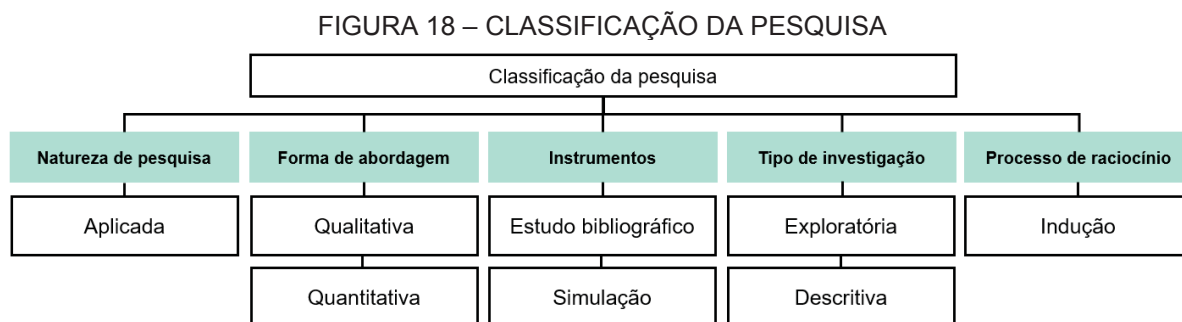


Fonte: O autor (2019).

O presente estudo encontra suas inevitáveis delimitações neste desafio de *tradeoffs*. A precisão da mensuração do efeito da flexibilidade de produção em um modelo de sistema de manufatura simulado computacionalmente oferece uma possibilidade excepcional de controle de variáveis, eliminação de fatores de ruído e redução de vieses que comprometem a interpretação dos resultados. Contudo, esta vantagem metodológica é tomada em detrimento do realismo que seria obtido em um estudo de caso, como o realizado por Fisher e Ittner (1999), para uma temática semelhante. Ademais, a busca por maior precisão na análise dos efeitos estatísticos obriga a definição minuciosa de uma série de fatores paralelos aos fatores experimentais (*e.g.* distribuição de probabilidade das chegadas dos consumidores, distribuição de probabilidade dos tempos de processamento dos produtos), impedindo que as conclusões obtidas possam ser amplamente generalizadas para outros cenários igualmente relevantes na prática industrial.

3.3 CLASSIFICAÇÃO DO MÉTODO DE PESQUISA

Um esquema para sintetizar a classificação do método de pesquisa deste trabalho é apresentado na FIGURA 18.



FONTE: O autor (2019).

A pesquisa é enquadrada como aplicada quanto à sua natureza. Nesses casos, o objetivo do trabalho é a solução de problemas específicos através da geração de conhecimento. Esse tipo de pesquisa é voltado à aplicação prática (SILVA e MENEZES, 2005; GIL, 1989). O estudo dos impactos da flexibilidade em um sistema de produção estabelece a natureza aplicável, apesar de delimitada, do trabalho.

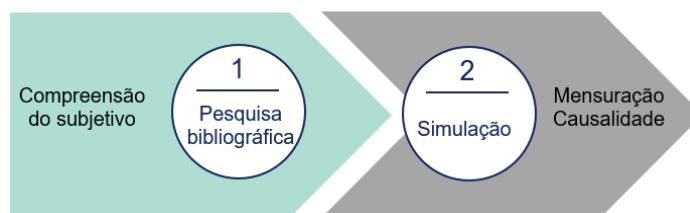
Os instrumentos metodológicos de pesquisa utilizados para este estudo são: pesquisa bibliográfica e simulação. A pesquisa bibliográfica é desenvolvida a partir de materiais que já foram criados previamente, como artigos científicos e livros (GIL, 1989) e está associada ao estágio inicial do presente trabalho, onde é levantada a teoria relacionada ao tema em três diferentes frentes (flexibilidade na manufatura, Indústria 4.0 e SCPP) tanto por revisões narrativas simples, quanto pela RSL. Ainda, utilizou-se da pesquisa bibliográfica para identificar as características da flexibilidade atrelada à Indústria 4.0.

O método de simulação é um método de pesquisa apropriado para a Engenharia de Produção, onde o pesquisador manipula uma série de variáveis e seus níveis em um modelo de pesquisa que corresponde a uma abstração da realidade. Nesse sentido, o modelo deve ser detalhado o bastante para representar os elementos essenciais do sistema real, porém simplificado o bastante para ser tratável através de métodos de análise e resolução (MIGUEL et al., 2012). O uso do método da simulação no trabalho está associado à modelagem de um sistema de produção.

No que diz respeito à forma de abordagem, a pesquisa possui tanto características qualitativas quanto quantitativas. O aspecto qualitativo surge em especial durante a etapa de levantamento bibliográfico, associada ao primeiro objetivo específico. A pesquisa qualitativa não tem aversão à quantificação de variáveis, porém possui a preocupação em obter informações sobre a perspectiva dos indivíduos e compreender suas realidades subjetivas (MIGUEL et al., 2012). Há uma busca em identificar uma relação dinâmica entre essa subjetividade do sujeito e a objetividade do mundo real, a qual não pode ser traduzida em números (SILVA e MENEZES, 2005). O aspecto quantitativo do trabalho surge durante a etapa de simulação, associada aos outros objetivos específicos propostos. Miguel et al. (2012) colocam que a simulação na Engenharia de Produção está associada à abordagem quantitativa, pois há manipulação numérica de variáveis e níveis de variáveis. A abordagem quantitativa acredita que todos os aspectos da pesquisa podem ser quantificáveis (SILVA e MENEZES, 2005). Especificamente, busca-se mensurar, estabelecer relações causais, generalizar ou replicar resultados obtidos (MIGUEL et al, 2012). A partir da tipologia de Bertrand e Fransoo (2002) para pesquisas quantitativas, pode-se ainda classificar esta etapa do trabalho como pesquisa axiomática descritiva, visto que há preocupação em analisar modelos quantitativos para entender e explicar o processo modelado.

Para o presente trabalho, é importante colocar que a abordagem mista não é utilizada para o emprego de triangulação, que consiste em uma técnica concebida por Creswell (1994), onde as abordagens quantitativa e qualitativa operam em paralelo para que qualquer tipo de viés inerente a método, pesquisador e fonte de dados seja neutralizado. Neste trabalho, de forma oposta, há uma complementaridade entre ambas as abordagens. Inicialmente, a abordagem qualitativa utiliza de sua capacidade de capturar relações não quantificáveis entre o ambiente e o subjetivo para que, ao fim, a abordagem quantitativa estabeleça de forma robusta as mensurações e relações de causalidade buscadas pelo trabalho. Uma representação visual dessa relação simbiótica está apresentada na FIGURA 19.

FIGURA 19 – ABORDAGEM MISTA PARA ESTE ESTUDO
Abordagem qualitativa Abordagem quantitativa



FONTE: O autor (2019).

Quanto ao processo de raciocínio adotado, a pesquisa é classificada como indutiva, uma vez que fatos adquiridos através da observação servem para a indução de teorias. No caso do trabalho, a partir da observação do comportamento de indicadores de desempenho frente à diferentes condições de flexibilidades, são feitas induções quanto a relações de causalidade. Na pesquisa por indução, tendo em mãos um conjunto de observações rigorosas e variadas, pode-se estabelecer uma afirmação universal, desde que nenhuma dessas observações entre em conflito com a indução feita (MIGUEL et al., 2012).

O tipo de investigação empregado na pesquisa pode ser classificado como exploratório e descritivo. A parcela exploratória consiste no levantamento bibliográfico e visa a estimular uma compreensão dos temas. A parcela descritiva, definida por Gil (1989) como a busca por descrever as características de um fenômeno ou estabelecer relações entre variáveis, consiste na etapa de simulação.

3.4 MODELAGEM DO SISTEMA DE PRODUÇÃO

Os experimentos de simulação foram conduzidos em um modelo de sistema de produção. O objetivo não é representar as complexidades particulares de qualquer indústria em particular, mas sim realizar experimentos em um ambiente controlado. Uma estratégia semelhante foi tomada por Thüerer e Stevenson (2018).

A estrutura do sistema de produção empregada neste trabalho consiste em uma linha de produção serial com $N=2$ estágios. Cada estágio j conta com um processo de manufatura PM_j . A disposição escolhida reflete a configuração mais simples em que ocorra a possibilidade de estoque intermediário entre estágios. A linha de produção não é cadenciada, *i.e.*, unidades de inventário podem existir entre os estágios produtivos; e é assíncrona, *i.e.*, os instantes de movimentação de peças em

cada estágio são independentes. Tais condições permitem que este modelo seja utilizado para a implementação de um SCPP.

Um número $i=1, \dots, M$ de produtos diferentes são fabricados, sendo M um parâmetro definido para cada experimento, visto que a quantidade de tipos de produtos é um fator de flexibilidade investigado neste trabalho (a apresentação dos fatores de flexibilidade e quais níveis foram estudados é detalhada na seção 3.5). Produtos acabados são imediatamente liberados quando demandas são recebidas (política *make-to-stock*). Se não há produtos disponíveis, os clientes aguardam o reabastecimento (*backorder*). A linha de produção pode ser representada como uma rede de filas: os pedidos para cada produto i chegam ao sistema com uma taxa de demanda homogênea λ , modelada por um processo de chegadas de Poisson. A utilização de um processo de chegada de Poisson permite a modelagem da incerteza nos instantes de chegadas de novos clientes e é amplamente utilizada, como pode ser observado em Al-Hawari, Qasem e Smadi (2018), Lee e Seo (2016) e MacDonald e Gunn (2011). A fabricação de cada produto i , em ambos os processos de manufatura, ocorre com uma taxa de serviço constante μ_i e tempo de processamento t_i , condicionados ao tipo de produto processado. O nível de heterogeneidade entre os tempos t_i também é um fator de flexibilidade investigado neste trabalho. A FIGURA 20 ilustra o sistema de produção proposto.

FIGURA 20 – MODELO DE SISTEMA DE PRODUÇÃO



FONTE: o autor (2019).

Dado um valor M de tipos de produtos manufaturados, o *mix* de demanda é distribuído igualmente entre cada produto $i=1, \dots, M$. Tomando λA como a taxa agregada de demanda do sistema, a taxa homogênea de demanda individual λ de cada produto pode ser calculada por $\lambda A / M$. Portanto, o efeito da alteração das taxas de demanda entre os produtos está fora do escopo deste trabalho. Para um estudo

onde foi mensurado especificamente o efeito da alteração das taxas de demanda de produtos em um SSCP, ver Onyeocha (2015).

A taxa de serviço média μA , constante em ambos os estágios de produção, se relaciona com λA por meio da definição de um índice de utilização de capacidade ρ , de acordo com a equação $\lambda A \cdot \rho = \mu A$. Tradicionalmente, estudos de filas são ainda limitados pelas expressões, propostas por Piplani e Ang (2017) e já adaptadas para este trabalho: $\lambda A < \mu A$ e $\lambda < \mu_i$.

λA é uma variável de difícil sistematização devido às características singulares de mercado para cada segmento industrial, porém, neste estudo, λA foi definida sem perda de generalidade em 60 produtos por hora. A utilização de capacidade ρ do sistema foi definida em 90%, resultando em uma taxa μA de 66,67 produtos por hora e, por consequência, tempo médio de processamento tA de 0,9 minutos (54 segundos), para ambos os estágios de produção. A escolha do valor de ρ é compatível com os valores encontrados em estudos correlatos, como Piplani e Ang (2017).

A transmissão de informações e liberação de ordens de produção entre os 2 estágios ocorre de acordo com uma estratégia de controle de produção puxado, especificada de acordo com o planejamento de experimentos.

3.5 FATORES DE FLEXIBILIDADE E INDICADORES DE DESEMPENHO

Para se verificar quais parâmetros e premissas estruturais têm o maior efeito em determinadas medidas de desempenho de um estudo de simulação, pode-se utilizar o método de planejamento de experimentos. Na terminologia do planejamento experimental, esses parâmetros de entrada do modelo são chamados de fatores, enquanto as medidas de saída são chamadas de respostas (LAW, 2014). Cada fator possui diferentes níveis, permitindo que a simulação possa ser avaliada em diferentes configurações do modelo proposto na seção 3.4.

Além de realizar testes com 3 diferentes políticas de SSCP, o planejamento de experimentos de simulação deste trabalho parte da definição de fatores de flexibilidade, os quais regulam, através de seus níveis, qual o nível de flexibilidade configurado para o cenário a ser simulado, de acordo com os tipos de flexibilidade atrelados à Indústria 4.0, *i.e.*, flexibilidade de *mix* (ver seção 2.2).

Conforme investigado durante a revisão de literatura, 2 aspectos são os principais impulsionadores da flexibilidade de *mix*: quantidade de produtos oferecidos aos clientes; e heterogeneidade dos produtos oferecidos aos clientes (KOSTE e MALHOTRA, 1999). Para representar estes 2 itens, são propostos 2 fatores experimentais: quantidade de tipos de produtos manufaturados pelo sistema de produção modelado, o qual altera o valor de M ; e heterogeneidade de tempo de processamento entre os tipos de produtos manufaturados pelo sistema de produção modelado, o qual altera os valores de t_i e, consequentemente, μ_i .

Em relação à determinação da quantidade de níveis, Montgomery (2001) coloca que os experimentos fatoriais de 2 níveis devem ser o pilar da experimentação industrial para o desenvolvimento, melhora e resolução de problemas de produtos e processos. Nesse sentido, dado as limitações de recurso computacional, são utilizados 2 níveis para todos os fatores analisados. Os fatores e seus níveis são apresentados no QUADRO 4. Cada diferente combinação representa a configuração de um cenário distinto (os experimentos são, ainda, realizados para cada 1 dos 3 SCPP contemplados neste estudo).

QUADRO 4 – FATORES E NÍVEIS PARA OS EXPERIMENTOS

| Fator | Descrição do fator | Níveis | |
|----------|--|-----------|----------|
| | | - (baixo) | + (alto) |
| <i>A</i> | Quantidade de tipos de produtos | 2 | 5 |
| <i>B</i> | Heterogeneidade de tempo de processamento entre os tipos de produtos | 10% | 100% |

Fonte: O autor (2019).

3.5.1 Fator quantidade de tipos de produtos

O fator quantidade de tipos de produtos busca expor o sistema produtivo simulado a diferentes amplitudes de *mix*, por meio da alteração da variável experimental M , que limita os tipos de produtos gerados para uma simulação. A alteração dos níveis do fator permite observar o efeito que a adição de produtos ao *mix* ocasiona nos indicadores de desempenho analisados. A escolha exata da abrangência de níveis para o estudo é uma tarefa complexa, visto que existem

exemplos de sistemas com apenas dois produtos, como a linha de montagem da Volkswagen apresentada no estudo de caso de Piplani e Ang (2017); bem como há registros de uma variedade de produtos que chega a $1,8 \times 10^{16}$ potenciais SKUs, como indicado por Fisher e Ittner (1999) em seu estudo de caso na planta de fabricação da General Motors em Wilmington. A estratégia sugerida por Law (2014) é de posicionar os níveis longes o bastante para que uma diferença na resposta seja esperada. Portanto, respeitando a limitação de recursos computacionais para a otimização dos parâmetros dos SCPP, tarefa que se torna mais custosa com um número maior de produtos, os níveis foram definidos em 2 tipos de produtos e 5 tipos de produtos.

3.5.2 Fator heterogeneidade de tempo de processamento

Além de determinar a quantidade de produtos, é necessário estabelecer de que forma esses produtos diferem entre si do ponto de vista do processo de manufatura. Para isso, utiliza-se um fator que controla a heterogeneidade de tempo de processamento entre os produtos do *mix*. A alteração dos níveis do fator permite observar o efeito que uma maior heterogeneidade entre os tempos de processamento ocasiona nos indicadores de desempenho analisados.

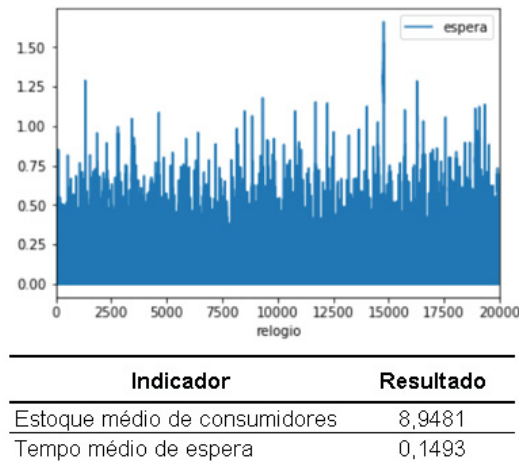
Antes de apresentar a maneira como a heterogeneidade é calculada, de modo que a taxa μ_A do processo de manufatura se mantenha sempre constante, como colocado na seção 3.4, é importante apresentar como a adição de um novo produto a um sistema de produção pode afetar o seu desempenho devido à alteração do índice de utilização da capacidade ρ , enviesando uma análise que visa a isolar o efeito da flexibilidade para observação.

3.5.2.1 Viés do índice de utilização de capacidade

Para isso, pode-se considerar um sistema de 1 única fila do tipo $M/M/1$, que serve um número finito de classes de consumidores $i=1, \dots, M$. Em um cenário inicial, $M = 1$ consumidores chegam no sistema com uma taxa $\lambda_1 = 60$ consumidores por hora. Os consumidores são servidos com uma taxa correspondente $\mu_1 = 66,67$ consumidores por hora, *i.e.*, média de $t_1 = 0,9$ minutos de tempo de serviço para cada consumidor, resultando em um índice de utilização da capacidade da fila de $\rho = \lambda_1 / \mu_1 = 90\%$. Utilizando uma variação do algoritmo de simulação descrito na seção 3.7,

é possível mensurar o tempo médio de permanência de cada consumidor no sistema, bem como o número médio de consumidores dentro do sistema, para 20000 horas de simulação conforme apresentado na FIGURA 21 (o algoritmo detalhado utilizado para esta demonstração é apresentado no APÊNDICE 4).

FIGURA 21 – RESULTADOS FILA M/M/1 PRIMEIRO CENÁRIO



Fonte: O autor (2019).

Os resultados simulados podem ainda ser validados pelas soluções analíticas disponíveis para filas do tipo $M/M/1$. Quantidade média de consumidores no sistema $L = \lambda_1 / (\mu_1 - \lambda_1) = 9 \approx 8,95$; tempo médio de espera $W = L / \lambda_1 = 0,15 \approx 0,1493$. Agora, em um novo cenário, uma nova classe de consumidores $i=2$ é admitida no sistema, canibalizando metade da demanda do sistema: $\lambda_1 = \lambda_2 = 30$ consumidores por hora, porém apresentando um tempo de serviço superior $t_2 = 1,08$ minuto / consumidor. Devido ao aumento no tempo médio de serviço $t_A = 0,99$ minutos / consumidor, a taxa de serviço média μ_A é penalizada e há um aumento no índice de utilização de capacidade, como demonstrado nas equações (1), (2) e (3), desenvolvidas a partir do trabalho de Piplani e Ang (2017).

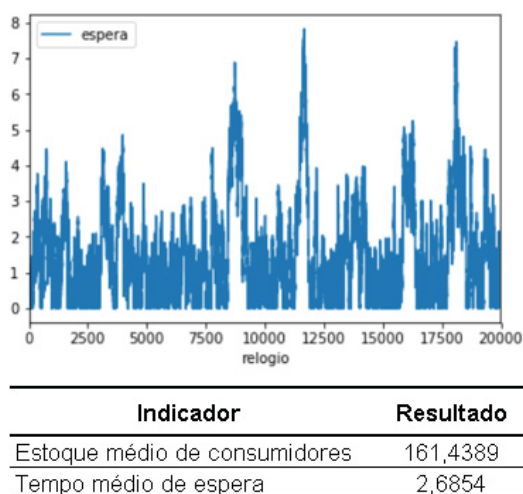
$$\lambda_A = \lambda_1 + \lambda_2 = 60 \quad (1)$$

$$\mu_A = \frac{\lambda_A \mu_1 \mu_2}{\lambda_1 \mu_2 + \lambda_2 \mu_1} = \frac{60 \cdot 66,67 \cdot 55,56}{30 \cdot 55,56 + 30 \cdot 66,67} = 60,61 \quad (2)$$

$$\rho = \frac{\lambda_A}{\mu_A} = 98,99\% \quad (3)$$

O aumento em p sinaliza uma redução da folga de capacidade ociosa que o sistema conta para atender aos consumidores. Portanto, dado que as condições de variabilidade de demanda e serviço se mantiveram constantes, espera-se que neste novo cenário seja observado um aumento do tempo médio de permanência dos consumidores e no estoque médio de consumidores. Este resultado pode ser observado na FIGURA 22 pela replicação da simulação anterior, agora com a introdução do novo produto.

FIGURA 22 – RESULTADOS FILA M/M/1 SEGUNDO CENÁRIO



Fonte: O autor (2019).

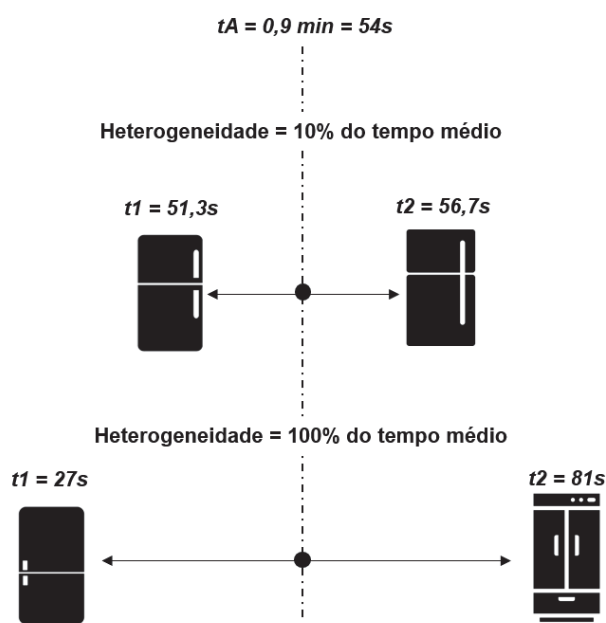
Cada estágio do modelo de sistema de produção puxado estudado neste trabalho opera, isoladamente, de forma análoga à fila descrita anteriormente. A chegada de um cartão Kanban indica a necessidade de reposição dos estoques consumidos pelos estágios posteriores. Se o aumento no número de produtos altera o p dos estágios produtivos, os resultados são afetados devido a alteração no tempo médio que cada processo de manufatura necessita para atender as ordens de produção recebidas, ou seja, o efeito da alteração de p interfere na análise do efeito da flexibilidade.

3.5.2.2 Cálculo da heterogeneidade

Para explicar a maneira como a heterogeneidade é calculada neste trabalho para os níveis de 10% e 100%, mantendo constantes os valores de μA e

consequentemente ρ , deve-se considerar o modelo apresentado na seção 3.4, onde cada processo produtivo PM_j , $j=1,2$ conta com uma taxa de serviço constante $\mu A = 66,67$ peças por hora, isto é, $tA = 0,9$ minutos por peça ou 54 segundos por peça. Para manter constante μA , o tempo de processamento de um produto 5% mais pesado que o tempo médio, deve ser compensado por um produto 5% mais leve que o tempo médio (deve-se lembrar que as taxas de demanda entre os produtos são homogêneas, definidas por $\lambda A / M$). No caso de apenas $M=2$ produtos, como esta diferença de 0,09 minutos ou 5,4 segundos entre os 2 produtos corresponde a 10% do valor do tempo médio, definiu-se que esse percentual representa o nível de heterogeneidade de tempo de processamento do sistema. De forma semelhante, uma heterogeneidade de 100% em relação ao tempo médio pode ser definida por $tA \pm 50\% \cdot tA$. Neste trabalho, portanto, o valor definido para um nível de heterogeneidade indica, em percentual, quanto vale a diferença de tempo entre o produto com menor tempo de processamento e o produto com maior tempo de processamento, em relação ao tempo médio de processamento de um estágio produtivo. Ambos os casos de 10% e 100% se encontram ilustrados na FIGURA 23, no caso de $M = 2$ tipos de produtos.

FIGURA 23 – NÍVEIS DE HETEROGENEIDADE PARA $M = 2$ PRODUTOS



Fonte: O autor (2019).

Quando o fator quantidade de produtos se encontra no nível $M=5$ produtos, tomando H , em percentual, como o nível de heterogeneidade (10% ou 100%) e considerando que os produtos estão posicionados em ordem crescente de tempo de processamento, os 2 valores extremos t_1 e t_5 podem ser calculados por (4) e (5).

$$t_1 = t_A - H/2 \cdot t_A \quad (4)$$

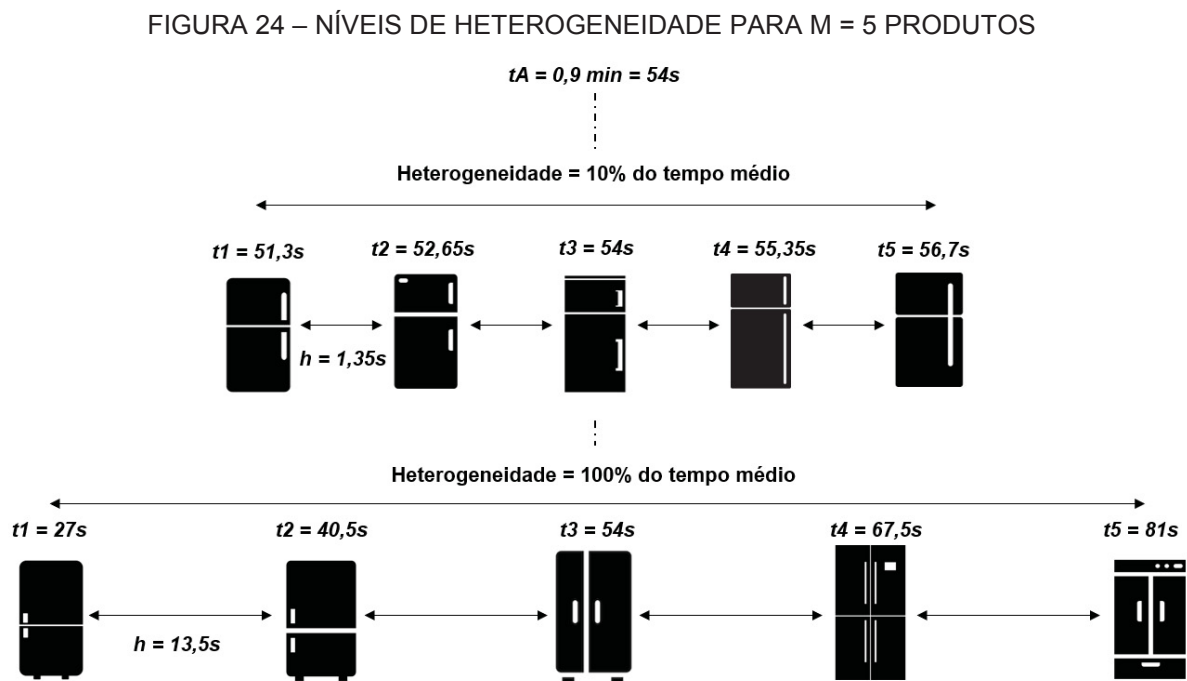
$$t_5 = t_A + H/2 \cdot t_A \quad (5)$$

A heterogeneidade de tempo h entre cada um dos produtos, em valor absoluto, pode ser calculada por (6). O valor de h indica os incrementos de tempo constantes entre t_1 e t_5 . Finalmente, cada um dos tempos t_i restantes para $i = 2, \dots, M-1$ pode ser calculado por (7).

$$h = \frac{(t_5 - t_1)}{M-1} \quad (6)$$

$$t_j = t_{j-1} + h \quad j = 2, \dots, M-1 \quad (7)$$

A FIGURA 24 ilustra os valores de heterogeneidade para os 2 níveis no caso de $M=5$ produtos.



Fonte: O autor (2019).

Os valores de heterogeneidade são arbitrados em 10% e 100%, com o intuito de contemplar desde a realidade de sistemas onde os produtos podem ser somente variantes uns dos outros, até casos onde ocorra diferença significativa entre cada produto oferecido.

3.5.3 Indicadores de desempenho

É necessário definir quais indicadores de desempenho devem ser utilizados na análise dos resultados. O desempenho do sistema após a execução de uma simulação pode ser medido através do nível de serviço, como é proposto por Al-Hawari, Qasem e Smadi (2018), Onyeocha (2015) e Bonvik, Couch e Gershwin (1997) em estudos de simulação semelhantes. Esse indicador verifica qual a porcentagem dos pedidos que foram atendidos imediatamente. O seguimento exclusivo do indicador de nível de serviço, contudo, não fornece visibilidade quanto ao nível de estoque de peças dentro do sistema produtivo, que é um importante sinalizador de custos. Ademais, ambos os indicadores de nível de serviço e estoque estabelecem uma relação de *trade-off* (KLASSEN e MENOR, 2007; BONVIK, COUCH e GERSHWIN, 1997), de modo que seu seguimento conjunto fornece subsídios para uma análise mais completa do desempenho relativo entre os diferentes cenários.

No caso deste trabalho, para a consideração conjunta de ambos os indicadores, os parâmetros ajustáveis dos SCPP são otimizados antes da análise dos resultados de cada cenário estudado, de modo que o nível de estoque resultante dos experimentos de simulação seja minimizado para o atendimento de um nível de serviço mínimo de 95% (a otimização dos parâmetros dos SCPP é detalhada na seção 3.8). Desta forma, a análise dos resultados é feita majoritariamente por meio da comparação de níveis de estoque entre os sistemas criados pelos diferentes cenários estudados, visto que todos já estão parametrizados para a garantia de um nível de serviço desejado. Estratégias semelhantes foram adotadas por Al-Hawari, Qasem e Smadi (2018), Onyeocha (2015), Onyeocha, Khoury e Geraghty (2015) e Onyeocha et al. (2015) utilizando níveis de serviço mínimos que variam entre 95% e 100%.

QUADRO 5 – DESCRIÇÃO DOS INDICADORES DE DESEMPENHO

| Indicador de resultado | Descrição |
|-------------------------|---|
| Nível de serviço (%) | Porcentagem dos pedidos que foram imediatamente satisfeitos |
| Nível médio de estoques | Valor médio do estoque de produtos em todo o sistema durante o período de simulação |

Fonte: O autor (2019).

3.6 MECANISMO DE UM SISTEMA DE PRODUÇÃO PUXADO

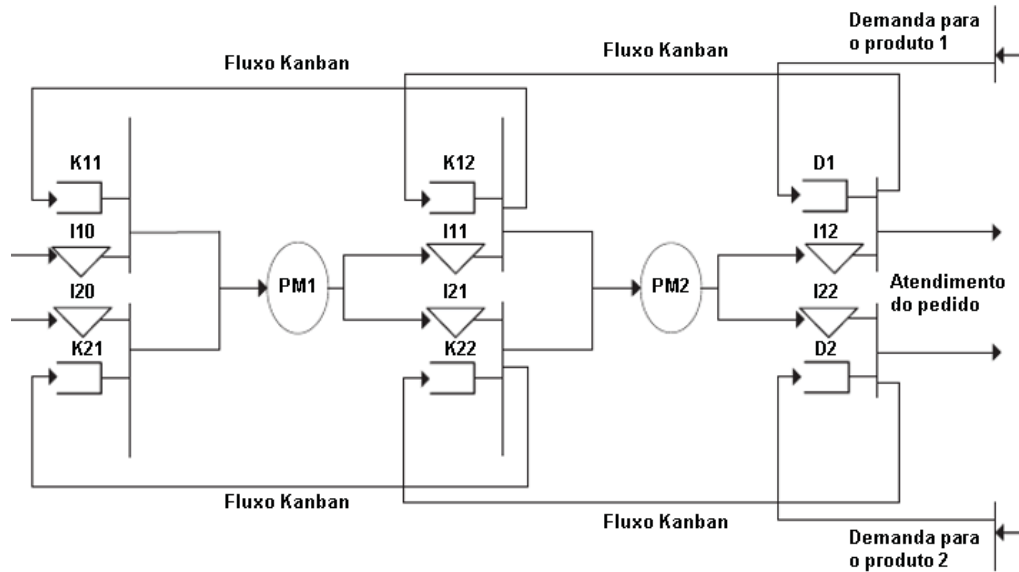
São analisadas 3 estratégias de SCPP neste trabalho: SCK, SCKE-D e SCKE-C. O SCK clássico tem relevância prática devido à implementação mais simples (PIPLANI e ANG, 2017) e popularidade entre os praticantes da indústria; enquanto o SCKE teve um bom desempenho em pesquisas anteriores (ver seção 2.3.3). As filas, parâmetros e mecanismos de operação de cada sistema são detalhados nesta seção.

3.6.1 Sistema de controle Kanban para múltiplos produtos

O comportamento de um SCK é ilustrado na FIGURA 25 para um sistema com $M = 2$ tipos de peças e $N = 2$ estágios de produção. As filas I_{ij} contêm partes acabadas com kanbans de estágio anexados. As filas K_{ij} contêm Kanbans de autorização de produção. Filas D_i contêm informações de demanda. Filas PM_j representam o processo de fabricação do estágio j . O número de partes para inicializar as filas I_{ij} é determinado por um parâmetro definido pelo usuário e otimizável s_{ij} . Todas as outras filas são inicializadas vazias.

A operação do SCK é acionada pela chegada de uma demanda para qualquer tipo de produto i , a qual é imediatamente transmitida à fila de demanda correspondente D_i . A chegada de uma demanda solicita a liberação de um produto i da fila I_{iN} para a satisfação do cliente. Se não houver nenhuma peça para ser liberada, o consumidor aguarda o reabastecimento da fila I_{iN} (*backorder*). Quando existem produtos disponíveis, a demanda é satisfeita pela liberação de um produto para o cliente e pelo destacamento de seu Kanban associado. O Kanban destacado é transferido no sentido contrário do fluxo produtivo para sua fila de Kanban correspondente K_{iN} .

FIGURA 25 – SISTEMA DE CONTROLE KANBAN DE 2 ESTÁGIOS E 2 PRODUTOS



Fonte: Adaptado de Onyeocha, Khoury e Geraghty (2015).

Para cada estágio $j = 1, \dots, N$, a produção é autorizada para um tipo de produto i se a fila K_{ij} não estiver vazia. Se esse requisito for atendido, um tipo de produto i é liberado da fila $I_{i,j-1}$ e seu Kanban anexado é enviado para a fila $K_{i,j-1}$. O tipo de produto é então anexado a um Kanban de estágio disponível da fila K_{ij} e é transferido para o PM_j . Um algoritmo do funcionamento deste mecanismo se encontra no QUADRO 6, considerando que uma lista P_j contenha todos os produtos demandados para um estágio j em uma ordem decrescente de prioridade; bem como uma 'lista produto' contenha as informações dos produtos autorizados para produção em um estágio j .

QUADRO 6 – MECANISMO DE UM SISTEMA DE CONTROLE KANBAN

Algoritmo 1: Sistema de controle Kanban: verifica quais produtos tem autorização para a produção em uma estação j , de acordo com as regras de um SCK, e envia os produtos ao PM_j

Entradas: $P[j]$, $K[1, \dots, M, j]$, $I[1, \dots, M, j]$, $PM[j]$, $produto[j]$

Saídas: $P[j]$, $K[1, \dots, M, j]$, $I[1, \dots, M, j]$, $PM[j]$, $produto[j]$

```

1   $I[1, \dots, M, 0] \leftarrow \infty$  // primeira estação com fornecimento ilimitado
2  para cada  $p$  em  $P[j]$  fazer // verifica todos os tipos de produto que foram
3      se  $K[p, j] > 0$  e  $I[p, j-1] > 0$  então // demandados, em ordem de prioridade
4           $K[p, j] \leftarrow K[p, j] - 1$ 
5           $K[p, j-1] \leftarrow K[p, j-1] + 1$ 
6           $I[p, j-1] \leftarrow I[p, j-1] - 1$ 
7           $PM[j] \leftarrow PM[j] + 1$ 
8          lista produto  $\leftarrow$  lista produto +  $p$  // envia a informação do tipo de produto ao
                                                    processo de manufatura
9  retornar  $P, K, I, PM, produto$ 

```

Fonte: o autor (2019).

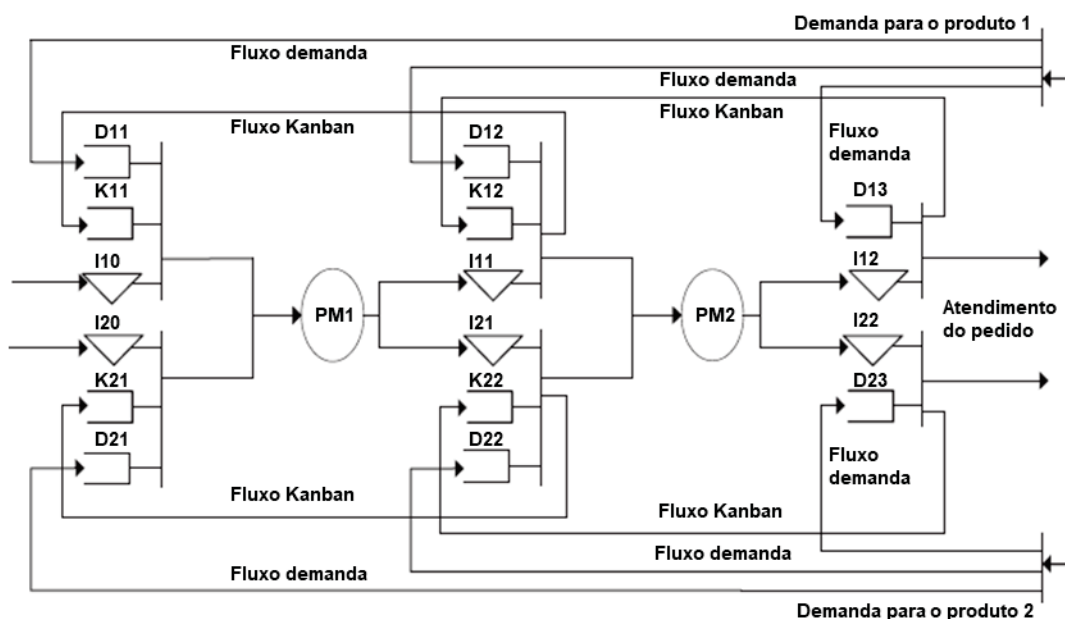
3.6.2 Sistema de controle Kanban estendido para múltiplos produtos

A operação de um SCKE para $M=2$ produtos e $N=2$ estágios é ilustrada na FIGURA 26. As filas I_{ij} contêm produtos acabados com Kanbans do estágio j anexados. Ao operar sob uma PDK-C, as filas K_j contêm Kanbans compartilhados do estágio j disponíveis. Ao operar sob uma PDK-D, as filas K_{ij} contêm Kanbans do estágio j dedicados disponíveis para cada tipo de produto $i = 1, \dots, M$. As filas D_{ij} contêm informações sobre as demandas. Filas PM_j representam o processo de fabricação do estágio j . O número de produtos para inicializar as filas I_{ij} é determinado por um parâmetro s_{ij} . De maneira distinta do SCK, o SCKE inicia a operação com um número pré-definido e otimizável de cartões Kanbans disponíveis nas filas K_j / K_{ij} , determinados pelos parâmetros c_i / c_{ij} . Todas as outras filas são iniciadas vazias.

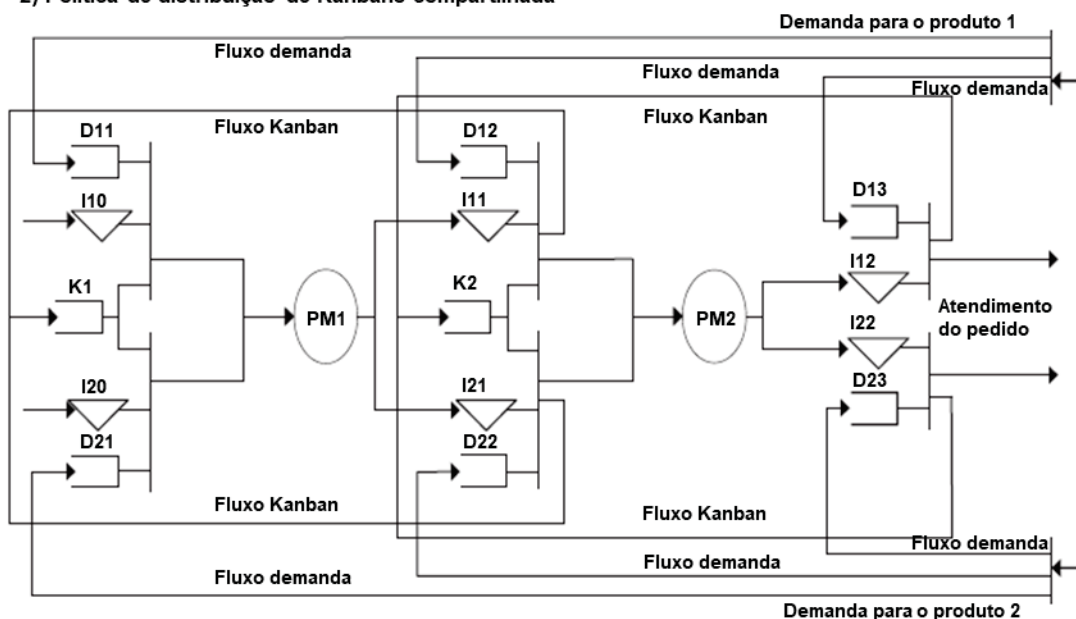
A operação do SCKE é acionada pela chegada de uma demanda para qualquer tipo de produto i . A informação de demanda é dividida e transmitida para todas as filas D_{ij} $j=1, \dots, N+1$. Quando uma demanda chega à fila D_{iN+1} e há produtos acabados na fila I_{iN} , um produto é liberado para o cliente e o Kanban que foi anexado ao produto é transferido para a fila de Kanbans K_N (PDK-C) ou K_{iN} (PDK-D) do último estágio de produção. Se não houver produtos acabados em I_{iN} , o cliente aguarda pela chegada de um produto finalizado. Quando as demandas chegam no restante das filas D_{ij} $j=1, \dots, N$, a produção é autorizada para um tipo de produto i se ambas as filas K_j / K_{ij} e I_{ij-1} não estiverem vazias, isto é, existem peças de entrada disponíveis e Kanbans de autorização para permitir a produção. Se esse requisito for atendido, um tipo de produto i é liberado da fila I_{ij-1} e seu Kanban anexado é enviado para a fila K_{j-1} / K_{ij-1} . A peça é então anexada a um Kanban disponível da fila K_j / K_{ij} e é transferida para o PM_j . A demanda satisfeita é excluída do sistema. Após o processamento, a peça e seu Kanban anexado são transferidos para a fila I_{ij} . Se o requisito de autorização não for atendido, a demanda é armazenada e aguarda até que todas as condições de autorização sejam atendidas.

FIGURA 26 – SISTEMA DE CONTROLE KANBAN ESTENDIDO DE 2 ESTÁGIOS E 2 PRODUTOS (DEDICADO E COMPARTILHADO)

1) Política de distribuição de Kanbans dedicada



2) Política de distribuição de Kanbans compartilhada



Fonte: Adaptado de Onyeocha, Khoury e Geraghty (2015).

O algoritmo de funcionamento de um SCKE pode ser observado no QUADRO 7. Novamente, uma lista P_j indica o armazenamento de todos os produtos demandados para um estágio j em uma ordem decrescente de prioridade; já a 'lista produto' representa o armazenamento das informações dos produtos autorizados para a produção em um estágio j .

QUADRO 7 – MECANISMO DE UM SISTEMA DE CONTROLE KANBAN ESTENDIDO

Algoritmo 2: Sistema de controle Kanban estendido: verifica quais produtos tem autorização para a produção em uma estação j , de acordo com as regras de um SCKE dedicado ou compartilhado, e envia os produtos ao PM j

Entradas: política ('dedicado' ou 'compartilhado'), $P[j]$, $D[1, \dots, M, j]$, $K[1, \dots, M, j]$ ou $K[j]$, $I[1, \dots, M, j]$, $PM[j]$, produto $[j]$

Saídas: $P[j]$, $K[1, \dots, M, j]$, $I[1, \dots, M, j]$, $PM[j]$, produto $[j]$

```

1   $I[1, \dots, M, 0] \leftarrow \infty$  // primeira estação com fornecimento ilimitado
2  para cada  $p$  em  $P[j]$  fazer // verifica todos os tipos de produto que foram
3      se política = 'dedicado' então // demandados, em ordem de prioridade
4          se  $D[p, j] > 0$ ,  $K[p, j] > 0$  e  $I[p, j - 1] > 0$  então
5               $D[p, j] \leftarrow D[p, j] - 1$ 
6               $K[p, j] \leftarrow K[p, j] - 1$ 
7               $K[p, j - 1] \leftarrow K[p, j - 1] + 1$ 
8               $I[p, j - 1] \leftarrow I[p, j - 1] - 1$ 
9               $PM[j] \leftarrow PM[j] + 1$ 
10             lista produto  $\leftarrow$  lista produto +  $p$  // envia a informação do tipo de produto ao
11             // processo de manufatura
12         se não
13             se  $D[p, j] > 0$ ,  $K[j] > 0$  e  $I[p, j - 1] > 0$  então
14                  $D[p, j] \leftarrow D[p, j] - 1$ 
15                  $K[j] \leftarrow K[j] - 1$ 
16                  $K[j - 1] \leftarrow K[j - 1] + 1$ 
17                  $I[p, j - 1] \leftarrow I[p, j - 1] - 1$ 
18                  $PM[j] \leftarrow PM[j] + 1$ 
19                 lista produto  $\leftarrow$  lista produto +  $p$  // envia a informação do tipo de produto ao
19                 // processo de manufatura
19 retornar  $P, K, I, PM, \text{produto}$ 

```

Fonte: o autor (2019).

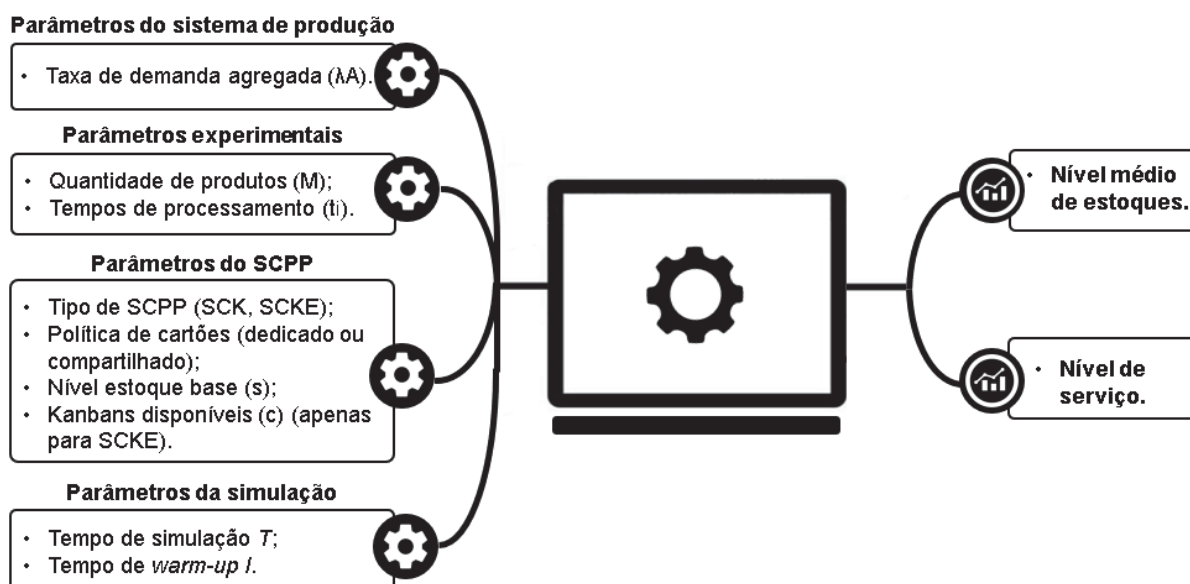
3.7 IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL DO MODELO DE SIMULAÇÃO

Nesta seção a implementação computacional do modelo de simulação é explicada através da apresentação de uma série de algoritmos. O modelo de simulação é utilizado, primeiramente, junto a um algoritmo de otimização de simulação (abordado na seção 3.8) para a otimização dos parâmetros iniciais dos SCPP (s e c) para cada cenário de flexibilidade experimentado; em seguida, o modelo de simulação é utilizado para a obtenção dos resultados do trabalho, de acordo com o objetivo específico d).

O modelo de simulação deste trabalho recebe parâmetros de entrada de diversas fontes: o valor fixo de λA , definido durante a modelagem do sistema de produção (ver seção 3.4); os valores experimentais que variam a cada cenário e dependem dos níveis dos fatores de flexibilidade M e t_i (ver seção 3.5); os valores dos parâmetros dos SCPP representados pelas variáveis s e c (ver seção 3.6); além dos parâmetros específicos da simulação: tempo de simulação T , e período de *warm-*

up do modelo de simulação I . Variáveis como ρ e μ_i já estão contempladas no cálculo de t_i para cada tipo de produto. Como funções desses valores de entrada, o modelo de simulação retorna os indicadores de desempenho de estoques e nível de serviço. A FIGURA 27 elucida todos os diferentes tipos de parâmetros de entrada do modelo de simulação estudado.

FIGURA 27 – ENTRADAS E SAÍDAS DO MODELO DE SIMULAÇÃO



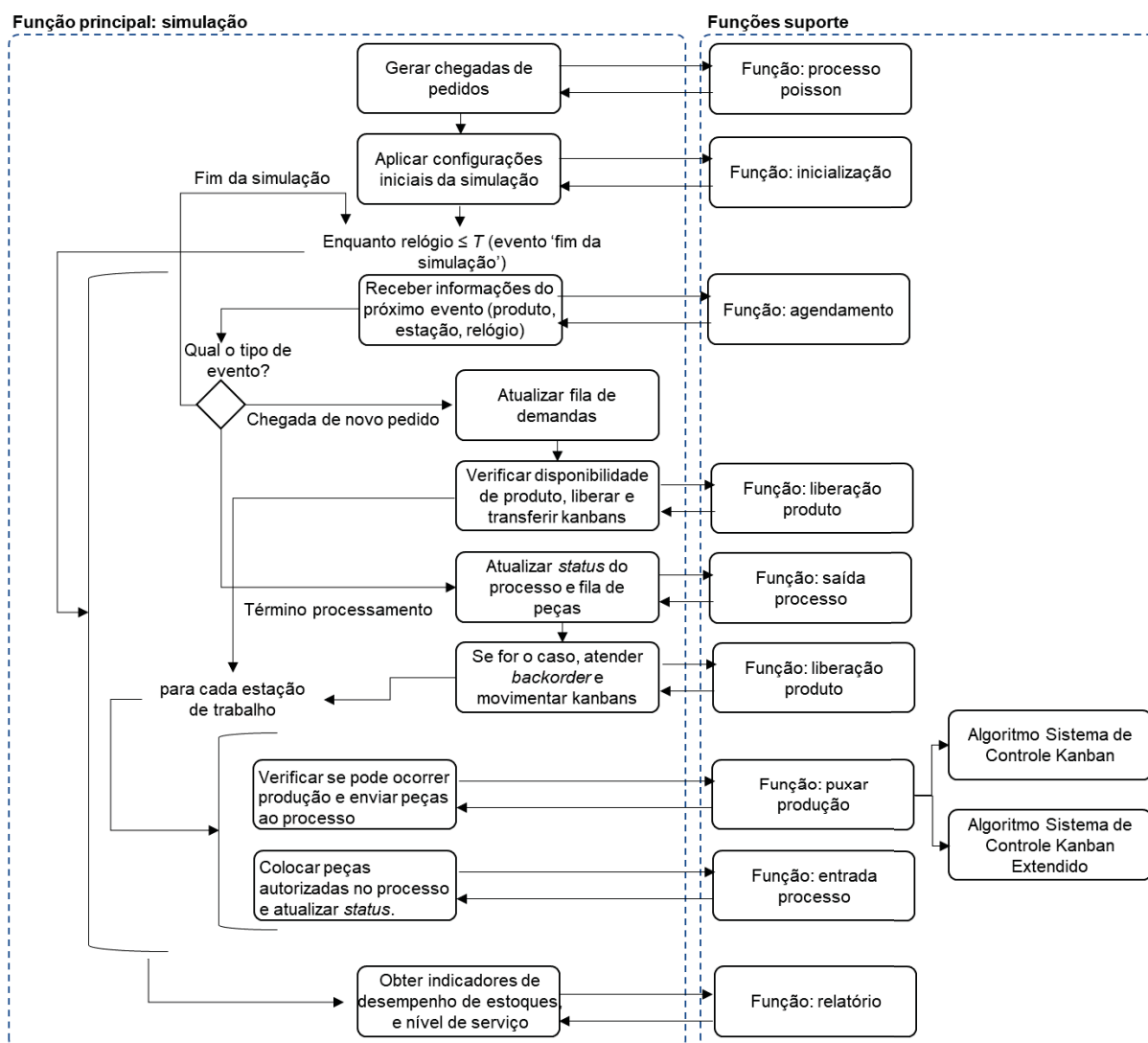
Fonte: o autor (2019).

A execução da simulação ocorre através de uma série de algoritmos. Os algoritmos, aqui representados em formato de pseudocódigo, foram programados na linguagem *Python* 3.6. O código original utilizado para programar os algoritmos de simulação pode ser encontrado no APÊNDICE 2. O autor observou duas vantagens principais da implementação do modelo de simulação por meio de uma linguagem de programação, quando comparada ao uso de *softwares* dedicados. Em primeiro lugar, há maior facilidade em construir a simulação como uma função que possa ser chamada nas diferentes configurações apresentadas no planejamento de experimentos, sem que haja necessidade de programar cada um dos cenários. Em segundo lugar, há maior flexibilidade para a construção de lógicas complexas de operação como as encontradas no SCKE, por exemplo.

A simulação é considerada de eventos discretos, de modo que o estado do sistema se altera somente em pontos discretos onde um evento ocorre (BANKS, 1998). O funcionamento da simulação ocorre através de uma rotina principal e de uma

série de funções de suporte. Uma representação visual dessa lógica pode ser observada na FIGURA 28.

FIGURA 28 – LÓGICA DE FUNCIONAMENTO DA SIMULAÇÃO



Fonte: O autor (2019).

A rotina principal chama a função Processo Poisson para obter os instantes de chegadas e os tipos de todos os pedidos. O algoritmo para esta função é apresentado no QUADRO 8. As funções denominadas aleatório exponencial e ordenar são consideradas funções internas e não têm seus algoritmos apresentados, dado que podem ser automaticamente chamadas pela biblioteca *numpy* dentro do *Python* 3.6. Uma distribuição exponencial para a geração de intervalos de chegada com parâmetro $1/\lambda$ é utilizada no algoritmo para a obtenção dos instantes de chegada, limitados superiormente por T , de M processos Poisson com uma mesma taxa λ .

QUADRO 8 – ALGORITMO PROCESSO POISSON

Algoritmo 3: Processo Poisson: Instantes de chegada processo Poisson: retorna o horário de chegada, limitado superiormente por T, de M processos Poisson com uma mesma taxa λ .

Entradas: T, λ , M

Saídas: instantes, produtos

```

1  para i = 1 até M fazer
2    total ← 0
3    enquanto VERDADEIRO fazer
4      intervalo ← aleatório exponencial (1/λ)
5      se (total + intervalo) < T então
6        total ← total + intervalo
7        chegadas ← chegadas + (total, i) // armazenar em lista instante de chegada e
8        se não                                produto correspondente
9        FALSO
10 chegadas ← ordenar(chegadas)           // ordenar chegadas independente de produto
11 instantes ← chegadas[..., 1]           // primeira coluna indica o instante de chegada
12 produtos ← chegadas[..., 2]           // segunda coluna indica o tipo de produto
13 retornar instantes, produtos

```

Fonte: O autor (2019).

As condições iniciais para o início da simulação são parametrizadas através da chamada de uma função de inicialização. Em seguida, a simulação opera através de um laço até que a condição de parada seja identificada (laço principal). Cada iteração do laço se inicia com a chamada da função de agendamento para verificar qual o próximo evento que deve ocorrer, obter suas informações e avançar o relógio para o momento de ocorrência. Essa abordagem de avanço do relógio é a mais popularmente utilizada em *softwares* e *frameworks* de simulação (LAW, 2014).

No algoritmo que se encontra no QUADRO 9, é apresentada a função de agendamento. Através da comparação entre o instante da próxima chegada de um pedido, o instante do próximo término de processamento e o limite de tempo da simulação, a função avança o relógio e fornece as informações do próximo evento à função principal. O algoritmo utiliza as funções internas mínimo, índice e deletar.

QUADRO 9 – ALGORITMO AGENDAMENTO

Algoritmo 4: agendamento: retorna as informações do próximo evento que irá ocorrer: tipo de evento (evento), produto e estágio de manufatura envolvidos e horário de ocorrência, a partir do horário vigente e das informações de chegada de pedidos restantes (instantes e produtos atualizado) e informações internas dos processos: tipo de produto processado (produto PM) e horário de término de processamento (término PM).

Entradas: instantes atualizado, produtos atualizado, relógio, T , término PM, produto PM

Saídas: evento, produto, relógio, estágio próximo término, instantes atualizado, produtos atualizado

```

1  se tamanho(instantes atualizado) > 0 então                                // verificar se existem ainda pedidos
2  |  próxima chegada ← instantes atualizado[0]                                restantes na simulação
3  se não
4  |  próxima chegada ← ∞
5  próximo término ← mínimo(término PM)
6  estágio próximo término ← índice(próximo término)                        // busca o índice da estação do próximo
7  se próxima chegada >  $T$  e próximo término >  $T$  então                        término
8  |  evento ← 'fim da simulação'
9  |  relógio ←  $T$ 
10 |  produto ← vazio
11 se próximo término ≤ próxima chegada então
12 |  evento ← 'término processamento'
13 |  relógio ← próximo término
14 |  produto ← produto PM[estágio próximo término]
15 se não
16 |  evento ← 'chegada pedido'
17 |  relógio ← próxima chegada
18 |  produto ← produtos atualizado[0]
19 |  deletar(instantes atualizado[0])                                          // atualizar pedidos restantes
20 |  deletar(produtos atualizado[0])                                          // atualizar pedidos restantes
21 retornar evento, produto, relógio, estágio próximo término, instantes atualizado, produtos atualizado

```

Fonte: O autor (2019).

No caso do evento “fim de simulação”, a função principal aborta o laço principal. No caso de um evento de chegada de pedido, as filas de demanda são atualizadas e a função de liberação produto é chamada para disponibilizar o produto ou registrar *backorder*, além de atualizar as filas de estoques, Kanbans e - no caso de uma estratégia SCK - a lista de prioridades, a qual prioriza a produção em um estágio a partir de uma lógica de “primeiro que chega, primeiro a ser servido” (a lista de prioridades do restante das estratégias é atualizada na função principal, visto que todos os processos de manufatura recebem diretamente informações de demanda em suas filas D). O histórico de *backorders* é utilizado posteriormente para o cálculo do nível de serviço, portanto só há atualização do histórico após o período de *warm-up* I . O algoritmo para a função liberação produto é apresentado no QUADRO 10.

QUADRO 10 – ALGORITMO LIBERAÇÃO PRODUTO

Algoritmo 5: liberação produto: verifica disponibilidade de produtos e faz a liberação ou acrescenta pedidos em *backorder*, além de transferir kanbans em caso de liberação de acordo com a política desejada. Retorna, após a liberação, a fila de demanda do último processo, fila de kanbans disponíveis para o último processo, estoque de produtos acabados, fila de *backorders*, quantidade de produtos entregues até o momento e histórico de *backorders*.

Entradas: produto, n , P , D , A , PA , atendidos, backorder, relógio, hist, SCPP, política, I

Saídas: $D[\text{produto}, n+1]$ ou $D[\text{produto}]$, $A[\text{produto}, n]$ ou $A[1, n]$, $I[\text{produto}, n]$, $P[n]$, backorder, atendidos, hist

```

1  se  $PA[\text{produto}, 6] = 0$  então
2    backorder[produto]  $\leftarrow$  backorder[produto] + 1
3    se relógio >  $I$  então
4      hist  $\leftarrow$  hist + 1 // só insere no histórico de backorders após o período de warm-up
5    se não
6      atendidos  $\leftarrow$  atendidos + 1
7      se backorder[produto] > 0 então
8        backorder[produto]  $\leftarrow$  backorder[produto] - 1
9      se SCPP = 'SCK' então
10        $D[\text{produto}] \leftarrow D[\text{produto}] - 1$  // destroi uma demanda
11        $A[\text{produto}, n] \leftarrow A[\text{produto}, n] + 1$  // transfere um kanban
12        $P[n] \leftarrow P[n] + \text{produto}$  // coloca o tipo de produto demandado ao fim da lista de prioridade
13        $I[\text{produto}, n] \leftarrow I[\text{produto}, n] + 1$  // retira um produto de estoque
14     se não
15        $D[\text{produto}, n+1] \leftarrow D[\text{produto}, n+1] - 1$  // destroi uma demanda
16        $I[\text{produto}, n] \leftarrow I[\text{produto}, n] + 1$  // retira um produto de estoque
17       se política = 'dedicado' então
18          $A[\text{produto}, n] \leftarrow A[\text{produto}, n] + 1$  // transfere um kanban dedicado
19       se não
20          $A[n] \leftarrow A[n] + 1$  // transfere um kanban compartilhado
21  retornar  $D[\text{produto}, n+1]$  ou  $D[\text{produto}]$ ,  $A[\text{produto}, n]$  ou  $A[1, n]$ ,  $I[\text{produto}, n]$ ,  $P[n]$ , backorder, atendidos, hist

```

Fonte: O autor (2019).

Já no caso de um evento de término de processamento em algum estágio de manufatura, a função saída processo é chamada para atualizar as filas I e PM , além de alterar o status de ociosidade do estágio e resetar o horário de término de processamento. Ainda, se o término de processamento ocorreu na última estação e há *backorder*, a função liberação produto é chamada para imediatamente repassar o produto finalizado para um dos clientes em espera. O algoritmo da função saída processo se encontra no QUADRO 11.

Após a ocorrência do evento que iniciou a iteração, deve ser verificado ainda se algum dos 2 PM pode iniciar a produção de alguma peça, de acordo com as regras de autorização de produção do SCPP simulado. Os algoritmos para esta etapa foram desenvolvidos na seção 3.6. A autorização de produção não é um evento indicado pela função de agendamento justamente porque a estratégia de controle de produção é puxada, de modo que o início de produção em um estágio ocorre imediatamente em resposta a algum evento que ocorre previamente.

QUADRO 11 – ALGORITMO SAÍDA PROCESSO

Algoritmo 6: saída processo: retira a peça finalizada de algum tipo de produto que acaba de ser processado e coloca no estoque de peças acabadas de um estágio de trabalho indicado. Altera o status do processo de trabalho para ocioso, reseta o horário de término de processamento.

Entradas: produto, estágio, I , PM , status PM , término PM , SCPP, política, n

Saídas: PM , I , status PM , término PM

```

1 status  $PM$ [estágio]  $\leftarrow$  0
2  $I$  [produto, estágio]  $\leftarrow I$  [produto, estágio] + 1
3  $PM$  [estágio]  $\leftarrow PM$  [estágio] - 1
4 término  $PM$ [estágio]  $\leftarrow \infty$ 
5 retornar  $PM$ ,  $I$ , status  $PM$ , término  $PM$ 

```

Fonte: O autor (2019).

Todos as peças que possuem autorização de produção são enviadas ao PM do estágio correspondente. A função entrada processo, apresentada no QUADRO 12, é chamada ao final do laço para colocar peças que foram autorizadas nos processos de manufatura de cada estágio j , de acordo com a disponibilidade do processo e seguindo a regra de priorização “primeiro que chega, primeiro a ser servido”.

QUADRO 12 – ALGORITMO ENTRADA PROCESSO

Algoritmo 7: entrada processo: da entrada de uma peça no processo de manufatura de um estágio indicado, com base numa regra de sequenciamento 'PCPS'. Altera o status do PM e indica qual produto entrará no PM , atualiza o horário de início de processamento do PM da estação, determina o tempo de processamento da estação com base na distribuição de probabilidade indicada e atualiza o horário de término de processamento do estágio. Retira o produto da lista de espera.

Entradas: lista produto, estágio, produto PM , status PM , início PM , término PM

Saídas: lista produto, produto PM , status PM , início PM , término PM

```

// só da entrada se houver produtos em
1 se tamanho(lista produto) > 0 e status  $PM$ [estágio] = 0 então espera e processo estiver ocioso
2   produto  $\leftarrow$  lista produto[0] // regra 'primeiro que chega, primeiro a ser servido'
3   produto  $PM$ [estágio]  $\leftarrow$  produto // indicação de tipo de produto que está entrando
4   deletar(lista produto[0]) // retira o produto da lista de espera do estágio
5   status  $PM$   $\leftarrow$  1
6   início  $PM$   $\leftarrow$  relógio
   término  $PM$   $\leftarrow$  início  $PM$  +  $t$ [produto] // tempo de processamento  $t$  determinado de acordo
7                                     com experimento
8 retornar lista produto, produto  $PM$ , status  $PM$ , início  $PM$ , término  $PM$ 

```

Fonte: O autor (2019).

Após a ocorrência de qualquer evento ao longo do laço, uma função de relatório guarda os principais dados da simulação para retornar ao usuário. Ao sair do laço principal, há ainda o cálculo dos indicadores de estoque médio e nível de serviço, não

considerando o período de warm-up I . Um relatório de todos os eventos, e os dois indicadores de desempenho são retornados ao usuário.

Após a finalização da implementação computacional, as seguintes etapas de verificação e validação foram realizadas em uma rodada de simulações teste para cada sistema puxado, com $T = 1/6$ hora, $M = 2$ produtos e parâmetros de heterogeneidade em 10%. Para a validação da modelagem conceitual, foi observado se as informações de demanda e movimentação de cartões ocorreram de maneira coerente com as regras estabelecidas na literatura. Para verificar a implementação computacional, a mudança no valor das filas D , A , I e PM foi conferida, para uma interação completa do laço principal, a partir do cálculo manual das filas. O relatório desta rodada de testes pode ser conferido no APÊNDICE 3.

3.8 OTIMIZAÇÃO DE SIMULAÇÃO PARA PARÂMETROS DOS SCPP

Como observado na seção 3.6, as filas I e K (somente para SCKE) devem ser inicializadas, respectivamente, com os valores indicados pelas variáveis s e c , parametrizadas pelos usuários do sistema de produção. A definição eficaz destes parâmetros é fundamental para adaptar o sistema puxado às circunstâncias experimentais, de modo que os indicadores de resultado possam refletir corretamente a capacidade e os limites operacionais de cada estratégia estudada, ao se variar as condições de flexibilidade. Para isto, uma série de simulações devem ser realizadas para a identificação dos valores dos parâmetros que minimizem o estoque, atendendo a um nível de serviço mínimo arbitrado em 95% (para uma explicação mais detalhada dos indicadores de desempenho, ver seção 3.5).

Este problema de localizar a melhor alternativa de parametrização de um sistema por meio de avaliações experimentais realizadas em uma simulação computacional é conhecido como um problema de otimização de simulação (LIN, SIR e PASUPATHY, 2013; ROSEN, HARMONOSKY e TRABAND, 2007). Seguindo a notação proposta por Rosen, Harmonosky e Traband (2007), busca-se minimizar uma função $f(\theta)$, sendo θ o conjunto de parâmetros testados, restritos dentro de algum conjunto de factibilidade Θ , e $f(\theta)$ a função que recebe os parâmetros e retorna a expectativa de desempenho do sistema. Considera-se que a função não pode ser representada analiticamente, somente por meio da expectativa de desempenho obtida pela execução de uma instância do modelo de simulação $\Psi(\theta, a)$, onde a representa

o efeito estocástico atuante no modelo, que interfere no desempenho de cada replicação do experimento de simulação. Tais pressuposições são apresentadas em (8), (9) e (10), adaptadas de Rosen, Harmonosky e Traband (2007).

$$\text{Min } f(\theta) \quad (8)$$

$$f(\theta) = E(\psi(\theta, a)) \quad (9)$$

$$\theta \in \Theta \quad (10)$$

Para adaptar essa representação ao problema de otimização dos parâmetros iniciais de um SCPP, é possível tomar $\theta = [s, c]$, onde o valor de cada parâmetro de estoque base s é limitado superiormente por 30; e cada parâmetro de Kanban disponível c é também limitado superiormente por 30. Tal delimitação se mostrou adequada para a abrangência de todas as soluções encontradas, conforme mostrado no capítulo 4. Devido a existência de duas respostas para o modelo de simulação, detalhado na seção 3.7, o desempenho do sistema modelado é mensurado por $\Psi = \psi_1, \psi_2$, os quais representam respectivamente o nível médio de estoque e o nível de serviço do sistema nas condições experimentadas. A otimização busca encontrar os parâmetros θ que minimizem a expectativa de estoques $f_1(\theta)$, desde que a expectativa de nível de serviço $f_2(\theta)$ atinja um requerimento mínimo de 95%. A otimização é necessária antes de avaliar os resultados de cada ponto do planejamento de experimentos, portanto todos os outros parâmetros de sistema de produção, experimento e simulação são considerados fixos e fora do escopo da otimização, não sendo incluídos nas notações utilizadas para esta seção. Desta forma, a modelagem do problema de otimização deste trabalho é apresentada nas equações (11), (12) e (13).

$$\text{Min } f_1(\theta) = E(\psi_1(\theta, a)) \quad (11)$$

s.a.

$$f_2(\theta) = E(\psi_2(\theta, a)) \geq 0,95 \quad (12)$$

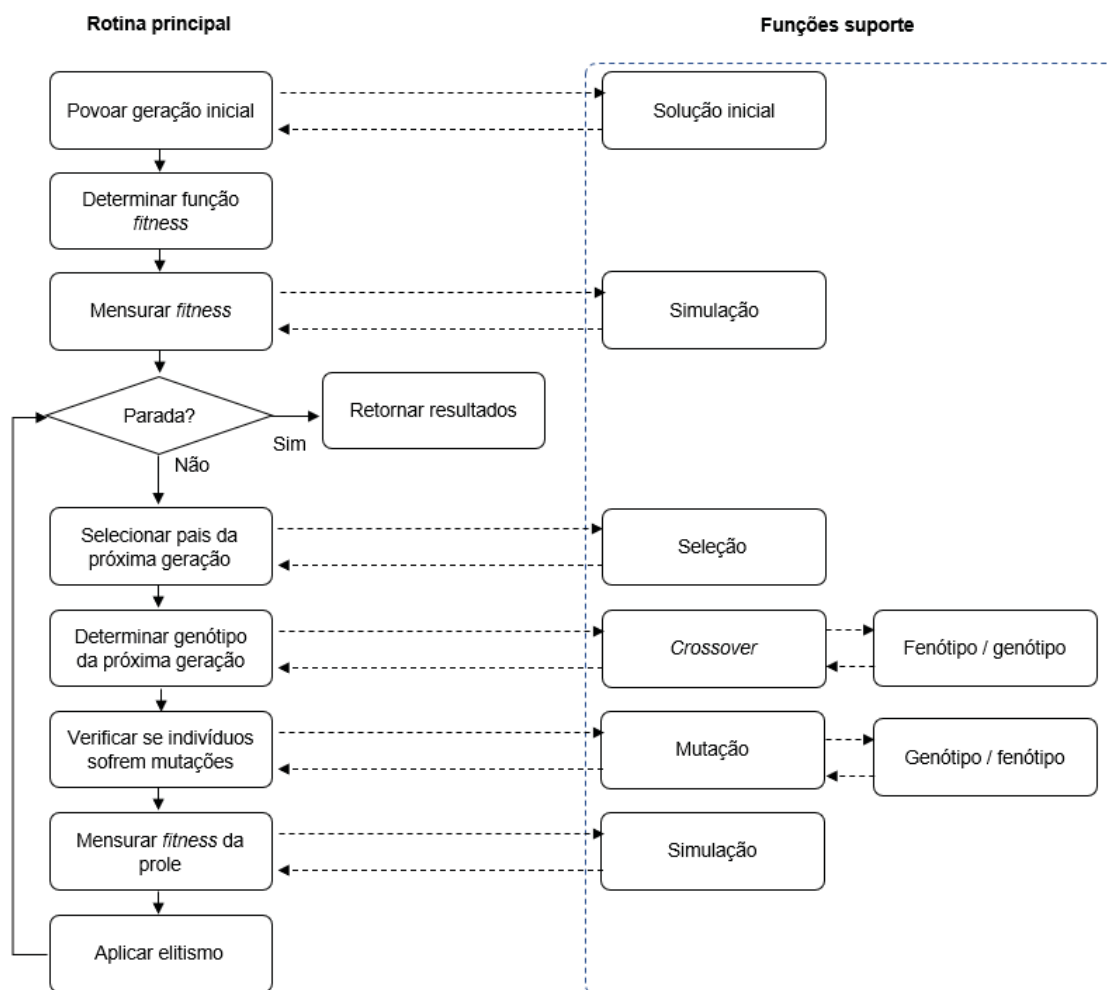
$$\theta \in \Theta \quad (13)$$

A utilização de meta-heurísticas é um dos instrumentos utilizados para a otimização de um modelo de simulação (LIN, SIR e PASUPATHY, 2013; MIRANDA et al., 2017). Em especial, um algoritmo genético (AG) foi utilizado para a otimização de parâmetros de sistemas de controle de produção puxado por Onyeocha, Khoury e Geraghty (2015), e também por Geraghty (2004). Neste trabalho, de forma semelhante, um AG é proposto para otimizar os parâmetros s e c para cada um dos cenários experimentados. Visto que uma variabilidade na qualidade da solução encontrada para pontos experimentais distintos pode representar um viés na análise dos resultados, um procedimento de análise de sensibilidade também é proposto, buscando garantir uma convergência robusta do algoritmo para cada ponto experimental simulado.

3.8.1 Algoritmo genético para otimização da simulação

Um AG é uma técnica de otimização motivada pelo princípio Darwiniano de evolução por meio de seleção genética. Através de uma abstração do processo evolutivo biológico, o algoritmo busca melhorar as soluções de um dado problema. Um AG opera em uma população de indivíduos artificiais ao longo de múltiplas gerações, os quais possuem seus parâmetros codificados - de forma análoga ao material genético de um cromossomo - e representam uma possível solução para o problema estudado. No caso deste trabalho, um indivíduo consiste em uma configuração qualquer factível dos parâmetros θ . A definição de uma função *fitness* quantifica, em um número real, o quão boa é a solução resultante da configuração de um indivíduo, em comparação com os outros indivíduos (MCCALL, 2005). As principais etapas do AG proposto neste trabalho são apresentadas na FIGURA 29. O código de programação implementado na linguagem *Python* 3.6 pode ser visualizado no APÊNDICE 5.

FIGURA 29 – ETAPAS DO ALGORITMO GENÉTICO



Fonte: O autor (2019).

O povoamento da geração inicial se dá pela definição aleatória de n indivíduos que compõe o tamanho de uma população. Os limites de valor para cada parâmetro a ser otimizado, já apresentados anteriormente, delimitam os valores aleatórios gerados para cada um dos n indivíduos iniciais. O algoritmo de povoamento de uma solução inicial com tamanho n é apresentado no QUADRO 13.

A utilização de uma população inicial com parâmetros aleatórios é uma das estratégias recomendadas na literatura (AKSOY e AKYAZI, 2019; MCCALL, 2005), visto que a pré-seleção dos primeiros indivíduos pode levar o AG a uma convergência prematura a um ponto de otimalidade local.

QUADRO 13 - POVOAMENTO INICIAL

Algoritmo 8: solução inicial: povoar a geração inicial de um algoritmo genético com N indivíduos, levando em conta os limites superiores e inferiores dos M parâmetros de cada indivíduo.

Entradas: N, M , limites parâmetros[1, ..., M , 2*]

* (primeira coluna: limite inferior, segunda coluna: limite superior)

Saídas: lista de parâmetros de todos os indivíduos

```

1 valores ← lista vazia
2 para  $i = 1$  até  $N$  fazer
2   para  $j = 1$  até  $M$  fazer
3     valores[ $i$ ] ← valores[ $i$ ] + aleatório inteiro entre(limites parâmetros[ $j$ , 1],
                                                         limites parâmetros[ $j$ , 2])
4 retornar lista de parâmetros de todos os indivíduos

```

Fonte: o autor (2019).

A função *fitness* deve quantificar a qualidade de uma solução composta por um conjunto experimentado de parâmetros θ , para que as soluções apresentadas por cada indivíduo possam ser comparadas entre si. A função utilizada para o problema estudado encontra-se em (14).

$$Fitness = -\left(\psi_1(\theta, a) + \delta(\max(0,95 - \psi_2(\theta, a), 0))\right) \quad (14)$$

$\psi_1(\theta, a)$ e $\psi_2(\theta, a)$ são as saídas de um experimento de simulação, como já abordado anteriormente. Para mitigar o efeito estocástico a , podem ser realizadas uma série de replicações para um mesmo cenário, sendo o valor de ψ_1 e ψ_2 calculado a partir da média dos indicadores obtidos em todas as replicações. Conforme detalhado na seção 3.9, todos os experimentos realizados neste trabalho tiveram seus indicadores obtidos a partir de $r = 30$ replicações. Na equação (14), busca-se primeiramente a minimização do valor médio de estoque, mensurado após a simulação por $\psi_1(\theta, a)$. Contudo, o nível de serviço mensurado por $\psi_2(\theta, a)$ é restrito em pelo menos 95%. A adição de uma restrição como essa ao objetivo de um AG pode ser executada de diferentes formas, e.g. por meio do acréscimo de um termo de penalização δ no cálculo do valor de *fitness* de um indivíduo, multiplicado pela diferença entre o valor mínimo aceitável de nível de serviço e o valor mensurado em $\psi_2(\theta, a)$. Caso a restrição não seja quebrada ($\psi_2(\theta, a) > 0,95$), não há qualquer penalização, visto que $\max()$ retorna o maior valor entre $(0,95 - \psi_2(\theta, a))$ e zero (o valor adequado de δ foi determinado experimentalmente por meio de análise de

sensibilidade). Por fim, visto que o conceito formal de *fitness* faz alusão a uma qualidade do indivíduo, o sinal negativo foi acrescentado ao início de (14) para a obtenção de uma variável do tipo maior-melhor a ser maximizada, para a manutenção do texto deste trabalho dentro das convenções empregadas na literatura.

Após mensurar a *fitness* dos indivíduos da população inicial, o algoritmo opera em um laço que representa um número pré-definido de gerações de indivíduos em constante evolução. O laço se inicia com a seleção de quais indivíduos serão os pais das proles que irão povoar a próxima geração. Os métodos de seleção devem priorizar de alguma forma os indivíduos com maior *fitness*, mas também devem conter algum nível de aleatoriedade. O método mais tradicional é a seleção por roleta (MCCALL, 2005), onde cada indivíduo tem probabilidade de ser selecionado proporcionalmente à sua *fitness* relativa, que é sua *fitness* em relação à soma dos valores de *fitness* de todos os indivíduos da população. Contudo, a seleção por roleta pode ser inapropriada para casos onde a função *fitness* tenha grandes diferenças de magnitude entre os indivíduos, visto que se 2 indivíduos possuírem valores muito superiores aos outros, eles também possuem probabilidade igualmente superior de serem escolhidos pais de todas as gerações subsequentes, comprometendo a capacidade de exploração do algoritmo (LYNCH, 2006). A utilização de penalização na função *fitness* para o controle do nível mínimo de serviço tem o potencial de criar estas diferenças de magnitude nas populações, portanto, para este trabalho foi escolhido o também tradicional método de seleção por torneio, cujo algoritmo se encontra no QUADRO 14.

QUADRO 14 – SELEÇÃO POR TORNEIO

Algoritmo 9: seleção torneio: seleciona 2 vencedores de uma seleção torneio envolvendo n participantes, sem considerar vencedores prévios nas escolhas subsequentes.

Entradas: código dos indivíduos, *fitness* dos indivíduos, n

Saídas: indivíduos selecionados

```

1  para  $i = 1$  até 2 fazer                                // 2 torneios (pai e mãe)
3      para  $j = 1$  até  $n$  fazer                            // n participantes
4          participante ← aleatório(código dos indivíduos)
5          se primeira interação ou  $fitness[participante] > fitness[melhor]$  então
6              melhor ← participante
7          indivíduos selecionados ← melhor
8          deletar(código dos indivíduos[melhor])        // retirar vencedor dos
                                                         próximos torneios
9  retornar indivíduos selecionados

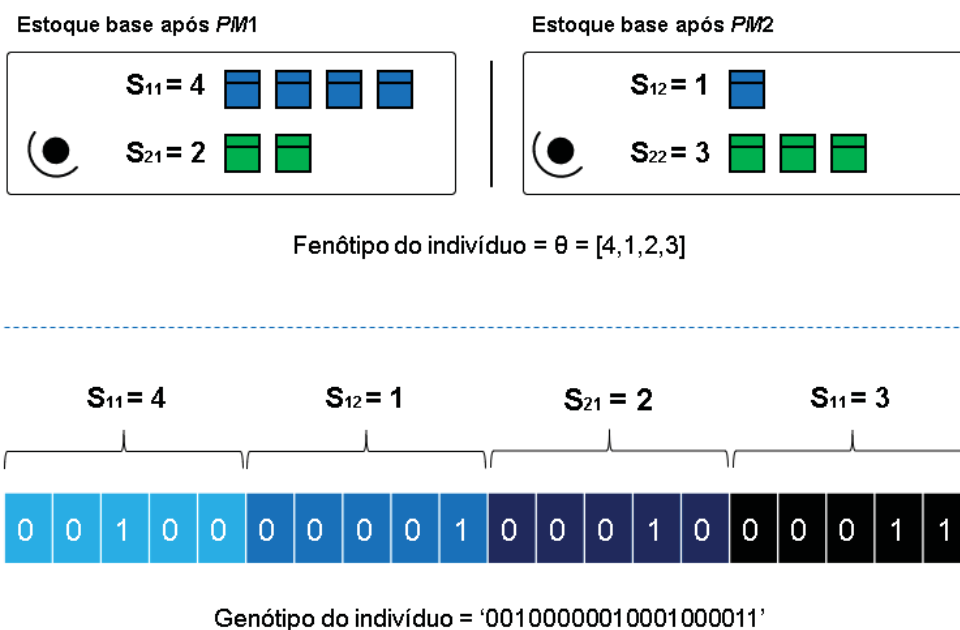
```

A seleção por torneio deste trabalho seleciona, a cada vez que é chamada, 2 indivíduos para serem os pais de uma única prole. Cada indivíduo é selecionado a partir de um torneio com n participantes, onde os participantes são selecionados aleatoriamente e o vencedor é o que apresenta melhor *fitness*.

Após a seleção, a configuração de parâmetros θ de uma prole é gerada a partir das configurações dos pais, além de efeitos aleatórios. Este processo é composto pelas etapas de *crossover* e mutação. Contudo, para que esta transferência de características de pais para proles ocorra, é necessário realizar manipulações e combinações de informações genéticas, as quais consistem em uma codificação das características reais de um indivíduo. Para que este conceito fique claro, devem ser definidos os conceitos de genótipo e fenótipo. Em termos biológicos, o fenótipo representa as características físicas de um indivíduo (e.g. cor dos olhos), e o genótipo representa a codificação genética que corresponde a esta característica física (WECK, 2010). No ser humano, a codificação é realizada no DNA, por meio da utilização de 4 proteínas.

Em um AG, a codificação binária costuma ser utilizada (WECK, 2010) para a codificação de um fenótipo em genótipo. Para este trabalho, o fenótipo é representado pelos parâmetros θ , correspondente aos níveis de estoque base s (KCS e SCKE) e cartões Kanbans disponíveis c (SCKE) parametrizados para um indivíduo. O genótipo é composto por um cromossomo de valores binários, dividido em múltiplos genes, cada um correspondente a um dos parâmetros encontrados em θ . Cada gene é ainda composto por 5 bits, que é a quantidade de dígitos binários necessária para a representação do maior valor inteiro possível (30) dentro dos limites impostos a θ . Um esquema para elucidar a relação entre fenótipo e genótipo dentro do escopo deste trabalho pode ser observado na FIGURA 30, considerando um indivíduo que representa uma possível solução para um SCK de 2 produtos.

FIGURA 30 – FENÓTIPO E GENÓTIPO DE UM INDIVÍDUO



Fonte: o autor (2019).

Um algoritmo que receba um vetor contendo parâmetros de um indivíduo (fenótipo) e codifique estes parâmetros em informações genéticas correspondentes (genótipo) pode ser observado no QUADRO 15. Já um algoritmo que faça o trajeto oposto, transformando um cromossomo em um vetor de parâmetros θ que possa ser simulado, pode ser observado na QUADRO 16.

QUADRO 15 – FENÓTIPO PARA GENÓTIPO

Algoritmo 10: fenótipo / genótipo: converte informações físicas do indivíduo (fenótipo) em informação genética correspondente (genótipo) por meio de transformação inteiro - binário (nº de bits por parâmetro inteiro é informado pelo usuário).

Entradas: fenótipo[1, ..., qtd. de parâmetros inteiros], nº de bits
Saídas: genótipo

```

1  genótipo ← string vazia
2  para i = 1 até quantidade de parâmetros inteiros fazer
3    genótipo ← genótipo + binário(fenótipo[i], nº de bits)
4  retornar genótipo

```

Fonte: o autor (2019).

QUADRO 16 – GENÓTIPO PARA FENÓTIPO

Algoritmo 11: genótipo / fenótipo: converte informações genéticas (genótipo) do indivíduo em informações físicas correspondentes (fenótipo) por meio de transformação binário - inteiro (nº de bits por parâmetro inteiro é informado pelo usuário).

Entradas: genótipo[1, ..., total bits], nº de bits

Saídas: fenótipo

```

1 fenótipo ← lista vazia
2 quantidade de parâmetros inteiros ← tamanho(genótipo)/nº bits
3 acumulado ← 1
4 para  $i = 1$  até quantidade de parâmetros inteiros fazer
5   fenótipo ← fenótipo + inteiro(genótipo[acumulado:acumulado+nº bits])
6   acumulado ← acumulado + nº bits
7 retornar fenótipo

```

Fonte: o autor (2019).

A partir dos cromossomos dos pais, o genótipo da prole pode ser determinado de diferentes formas. 2 técnicas de crossover são particularmente habituais: *crossover* de ponto único e *crossover* uniforme. O método de ponto único tem sua inspiração no *crossover* biológico. Um ponto aleatório de *crossover* é definido com probabilidade uniforme dentro da extensão do cromossomo. A partir deste ponto, o cromossomo de duas diferentes proles pode ser construído utilizando a informação do pai até o ponto de *crossover*, e a informação da mãe a partir do ponto de *crossover* (MCCALL, 2005). Em estratégias em que cada casal de pais gera apenas uma prole, como a apresentada neste trabalho, o cromossomo da segunda prole pode ser descartado. Um algoritmo para o *crossover* de ponto único é apresentado no QUADRO 17.

Já o método de *crossover* uniforme transcende o conceito biológico, oferecendo uma outra possibilidade de evolução. Neste caso, cada bit do cromossomo de uma prole é construído ao selecionar o bit correspondente do cromossomo de um dos dois pais, com probabilidade uniforme (MCCALL, 2005). O algoritmo para um *crossover* uniforme se encontra no QUADRO 18.

QUADRO 17 – CROSSOVER PONTO ÚNICO

Algoritmo 12: *crossover* ponto único: executa operação de *crossover* e determina o genótipo da prole por meio do método de *crossover* ponto único, tendo como entrada o fenótipo do pai e da mãe.

Entradas: fenótipo pai, fenótipo mãe, nº bits

Saídas: genótipo prole

```

1  genótipo pai ← fenótipo / genótipo(fenótipo pai, nº bits)
2  genótipo mãe ← fenótipo / genótipo(fenótipo mãe, nº bits)
3   $n \leftarrow \text{tamanho}(\text{genótipo pai} / \text{mãe})$ 
4  genótipo prole ← string vazia
5  ponto ← aleatório inteiro entre 1 e  $n$            // ponto de cruzamento
6  parte esquerda ← genótipo pai [..., ponto]       entre cromossomos
7  parte direita ← genótipo mãe [ponto, ...]
8  genótipo prole ← parte esquerda + parte direita  // concatenar as partes
9  retornar genótipo prole

```

Fonte: o autor (2019).

QUADRO 18 – CROSSOVER UNIFORME

Algoritmo 13: *crossover* uniforme: executa operação de *crossover* e determina o genótipo da prole por meio do método de *crossover* uniforme, tendo como entrada o fenótipo do pai e da mãe.

Entradas: fenótipo pai, fenótipo mãe, nº bits

Saídas: genótipo prole

```

1  genótipo pai ← fenótipo / genótipo(fenótipo pai, nº bits)
2  genótipo mãe ← fenótipo / genótipo(fenótipo mãe, nº bits)
3   $n \leftarrow \text{tamanho}(\text{genótipo pai} / \text{mãe})$ 
4  genótipo prole ← string vazia
5   $k \leftarrow 1$ 
6  para  $i = 1$  até  $n$  fazer
7      parentesco ← aleatório "jogue uma moeda" entre 0 e 1
8      se parentesco = 0 então
9          genótipo prole ← genótipo prole + genótipo pai[k]
10     se não
11         genótipo prole ← genótipo prole + genótipo mãe[k]
12      $k \leftarrow k + 1$ 
13 retornar genótipo prole

```

Fonte: o autor (2019).

Após a etapa de *crossover*, o cromossomo da prole é exposto à possibilidade de mutação. O estágio de mutação contribui para a obtenção de maior diversidade na população, por meio de alterações no cromossomo que independem das características do parentesco da prole. A forma mais comum de realizar a mutação é estabelecendo uma probabilidade de mutação p . Para cada bit do cromossomo da

prole, um valor aleatório é gerado entre 0 e 1; caso o valor gerado não seja superior a p , a mutação ocorre através da inversão do valor do bit (MCCALL, 2005). Um algoritmo para a realização de mutação é proposto no QUADRO 19. Ao fim da mutação, o algoritmo genótipo / fenótipo transforma as informações genéticas das proles nos parâmetros θ utilizados nas simulações.

QUADRO 19 – MUTAÇÃO

Algoritmo 14: mutação: para cada bit (alela) dos genes do cromossomo de uma prole, realiza mutações (troca de valor do bit) com probabilidade indicada por p . Retorna o fenótipo resultante da prole.

Entradas: genótipo prole, p , nº bits

Saídas: fenótipo prole

```

1  genótipo após mutação ← string vazia
2  para cada bit no genótipo prole fazer
3      mutador ← aleatório entre 0 e 1
4      se mutador ≤  $p$  então                // executar a mutação
5          se bit = '1' então                // inverter bit
6              genótipo após mutação ← genótipo após mutação + '0'
7          se não
8              genótipo após mutação ← genótipo após mutação + '1'
9      se não                                // não executar mutação
10         se bit = '1' então                // manter bit original
11             genótipo após mutação ← genótipo após mutação + '1'
12         se não
13             genótipo após mutação ← genótipo após mutação + '0'
14  fenótipo prole ← genótipo / fenótipo(genótipo após mutação, nº bits)
15  retornar fenótipo prole

```

Fonte: o autor (2019).

Por fim, ao fim de uma interação, é comum que um processo de seleção determine alguns indivíduos para permanecerem na próxima geração, em conjunto com as proles geradas, em uma estratégia comumente chamada de elitismo (LYNCH, 2006; WECK, 2010). Desta forma, as melhores soluções já encontradas são sempre mantidas a cada geração. Tomando novamente n como o tamanho da população, e q como a quantidade de proles nascidas em uma geração, sendo $q < n$, os $n - q$ indivíduos com melhor *fitness* podem ser mantidos na próxima geração. Apesar de normalmente a maior parte de uma população ser repostada em diversas aplicações de AG, neste trabalho as restrições de recurso computacional são um empecilho para o nascimento de um alto número de proles a cada geração, visto que o cálculo de *fitness* de cada indivíduo depende da execução de um experimento de simulação.

3.8.2 Análise de sensibilidade do algoritmo genético

A efetividade do AG em otimizar da melhor forma cada um dos pontos experimentais deste trabalho é um fator determinante para a averiguação dos resultados sem que o método de otimização seja uma fonte de viés. Neste sentido, 2 principais desafios são observados:

- um AG não parametrizado corretamente pode levar a resultados muito diferentes em diferentes rodadas de um mesmo cenário experimental, de modo que a mensuração dos resultados não apresentam qualquer robustez;
- Uma otimização de melhor qualidade gerada em um ponto experimental pode levar a falsa conclusão de superioridade de desempenho do sistema naquelas condições experimentadas de flexibilidade e SCPP.

Neste sentido, o AG deve ser parametrizado de maneira ideal para que cada ponto apresente a melhor configuração possível para análise. Para isto, uma série de parâmetros do AG foi testada em uma amplitude de valores. A parametrização ideal deve apresentar o melhor resultado, avaliado através do nível de *fitness* do melhor indivíduo da última geração; e de maneira robusta, avaliado através da execução de 3 replicações para cada combinação de parâmetros do AG e verificação do coeficiente de variação das soluções.

A análise de sensibilidade foi feita nos seguintes parâmetros do AG: tamanho de população n , quantidade de iterações ou gerações, estratégia de *crossover*, estratégia e probabilidade p de mutação, política de seleção de indivíduos para a próxima geração e magnitude do termo de penalização δ . É comumente recomendado que o tamanho de população n seja razoavelmente grande para evitar soluções pobres (ROEVA, FIDANOVA e PAPRZYCKI, 2013), contudo, a definição de um bom valor é dependente das características específicas de cada problema. Foram testadas as possibilidades de $n = 5 \cdot \text{quantidade de parâmetros em } \theta$; e $n = 10 \cdot \text{quantidade de parâmetros em } \theta$. Quanto a quantidade de iterações, foram experimentados um total de $(50 \cdot \text{quantidade de parâmetros em } \theta)$ iterações e $(100 \cdot \text{quantidade de parâmetros em } \theta)$ iterações, tendo em vista os altos custos computacionais de opções mais intensivas.

Quanto a probabilidade de mutação p , um AG deve buscar um balanço ideal entre as capacidades de exploração e convergência. Probabilidades de mutação

muito altas impedem a convergência e valores muito baixos podem levar a convergência prematura a um ponto de otimalidade local (GREENWELL, ANGUS e FINCK, 1995). Contudo, uma opção mais refinada é a utilização de probabilidades de mutação dinâmicas, as quais assumem diferentes papéis nas fases iniciais e finais da execução do algoritmo. A utilização de probabilidade de mutação maior no início do processo de otimização oferece uma proteção contra a alta variação de qualidade da geração inicial aleatória, visto que permite que o AG explore diferentes configurações dos parâmetros θ ao alterar os valores dos bits mais frequentemente. Já no final da execução do algoritmo, uma probabilidade de mutação menor permite que o algoritmo busque convergência no melhor resultado. O tamanho de uma geração e uma alta taxa de renovação das gerações aliada a um número razoável de iterações permite que o AG busque convergência sem depender da qualidade da solução inicial, mas devido às restrições de recurso computacional que delimitam este estudo de otimização de simulação, o uso da probabilidade de mutação pode também auxiliar nesta tentativa de mitigar qualquer viés decorrente da qualidade (aleatória) de uma geração inicial. Ao longo do processo de otimização, p pode ser dinamicamente reduzida até um valor mínimo, determinado previamente. Para operacionalizar esta redução de forma linear, pode-se definir as probabilidades extremas p_{min} e p_{max} de mutação de 1 bit. A redução gradual de p ao longo do processo de otimização pode ser calculada por (15).

$$\frac{(p_{max} - p_{min})}{\text{quantidade de iterações}} \quad (15)$$

De forma similar aos valores de tamanho de população e quantidade de iterações, a definição de p_{max} e p_{min} depende da quantidade de parâmetros θ , visto que a probabilidade de mutação é aplicada a cada bit individualmente. Um SCK de $M = 2$ produtos, por exemplo, contêm 4 parâmetros (s_{11} , s_{12} , s_{21} , s_{22}) e 20 bits em seu cromossomo, como visto na FIGURA 30, anteriormente apresentada. Nesse caso, uma probabilidade de mutação $p = 2\%$ resulta em um valor esperado de $20 \cdot 2\% = 0,4$ bits mutados no cromossomo, cada vez que ocorre um processo de mutação. Já um SCKE de $M = 2$ produtos, contêm 8 parâmetros (s_{11} , s_{12} , s_{21} , s_{22} , k_{11} , k_{12} , k_{21} , k_{22}) e 40 bits em seu cromossomo. A mesma probabilidade $p = 2\%$ resulta em um valor esperado superior de 0,8 bits mutados no cromossomo, a cada processo de mutação.

Devido a esta diferença na quantidade de parâmetros entre os diferentes SCPP e os diferentes valores de M , as variáveis p_{max} e p_{min} foram definidas de maneira personalizada para cada cenário, de modo que exista uma esperança de que 1,5 bits do cromossomo sofram mutação durante a primeira geração; e 0,5 bits do cromossomo sofram mutação na última geração. O uso de probabilidade fixa ($p = 2\%$) para todos os cenários e durante todo o processo de otimização chegou a ser testado em uma fase inicial deste estudo, mas foi descartado devido à apresentação de resultados poucos consistentes. Por outro lado, como demonstrado no capítulo de resultados, a utilização de probabilidades de mutação dinâmicas foi essencial para a obtenção de resultados consistentes nos diferentes experimentos realizados no trabalho.

O QUADRO 20 busca elucidar os valores testados de tamanho de população, quantidade de iterações e probabilidade de mutação (p_{max} e p_{min}) em relação a cada SCPP e valor de M possíveis.

QUADRO 20 –VALORES DE TAMANHO DE POPUALAÇÃO, QUANTIDADE DE ITERAÇÕES E PROBABILIDADE DE MUTAÇÃO DO ALGORITMO GENÉTICO

| SCPP | Sistema de Controle Kanban | | Sistema de Controle Kanban Estendido (dedicado) | | Sistema de Controle Kanban Estendido (compartilhado) | |
|---|----------------------------|---------|---|---------|--|---------|
| | $M = 2$ | $M = 5$ | $M = 2$ | $M = 5$ | $M = 2$ | $M = 5$ |
| Quantidade de produtos nº parâmetros | 4 | 10 | 8 | 20 | 6 | 12 |
| Tamanho da população 1ª opção | 20 | 50 | 40 | 100 | 30 | 60 |
| Tamanho da população 2ª opção | 40 | 100 | 80 | 200 | 60 | 120 |
| Quantidade de iteraões 1ª opção | 200 | 500 | 400 | 1000 | 300 | 600 |
| Quantidade de iteraões 2ª opção | 400 | 1000 | 800 | 2000 | 600 | 1200 |
| p_{max} | 7,50% | 3% | 3,75% | 1,50% | 5% | 2,50% |
| p_{min} | 2,50% | 1% | 1,25% | 0,50% | 1,67% | 0,83% |

Fonte: o autor (2019).

As usuais estratégias de *crossover* de ponto único e uniforme foram testadas, com a probabilidade de ocorrência de *crossover* fixada em 100%. Quanto às estratégias de seleção de indivíduos para a próxima geração, foram testadas a concepção de 2, 4 e 6 proles por geração, a partir da seleção independente de 1,2 e 3 casais para a realização de *crossover*, respectivamente. Uma maior taxa de renovação da população poderia trazer mais consistência ao algoritmo, porém é

impraticável devido aos limites de recurso computacional que se encontram presentes. Por fim, termos de penalização δ com magnitude 100 e 1000 foram testados.

A configuração do AG escolhida para cada cenário foi aquela que entregou o melhor resultado (estoque mínimo), de maneira consistente, *i.e.*, com baixa variabilidade na qualidade da melhor solução encontrada. Para avaliar a consistência do método de otimização, foram realizadas 3 rodadas de otimização para as configurações testadas e foi observado o coeficiente de variação (CV) das soluções encontradas, como mostrado em (16), tomando σ como o desvio padrão e \bar{x} como a média entre as soluções encontradas.

$$CV(\%) = \frac{\sigma}{\bar{x}} \quad (16)$$

As curvas de convergências dos AG, análise de robustez através de CV das soluções encontradas e apresentação dos parâmetros de AG escolhidos para cada cenário experimentado estão apresentados na análise de resultados (Capítulo 4).

3.9 ESTRATÉGIA DE OBTENÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Com os fatores, indicadores de desempenho e configurações de simulação definidos, bem como modelo de simulação implementado, é necessário estabelecer de que forma os experimentos devem ser conduzidos e como o resultado de cada experimento vai ser traduzido em resultados relevantes para os objetivos deste trabalho.

Os experimentos foram conduzidos em um computador pessoal com processador core i7 2.80 GHz e 16 GB de memória RAM. O ambiente de desenvolvimento em *Python Spyder* 3.2.8 foi utilizado para a programação dos algoritmos apresentados na seção 3.6, 3.7 e 3.8. O planejamento de experimentos contou com um total de 12 pontos (2 níveis de cada fator de flexibilidade e 3 SCPP), como ilustrado no QUADRO 21.

Antes da obter os resultados, cada ponto experimental $k=1, \dots, 12$ foi submetido a um processo de otimização dos parâmetros θ (s e c) por meio de um AG, apresentado na seção 3.8, para obtenção dos parâmetros otimizados θ^*_k . Para configurar o AG da melhor forma, foi conduzida uma análise de sensibilidade para

cada ponto experimental. Os experimentos de simulação durante esta etapa de otimização foram realizados com parâmetros $T = 30$ horas, $I = 3$ horas e foram replicados 30 vezes para obtenção dos indicadores ψ_1 e ψ_2 . Após a obtenção de θ^*_k para cada ponto experimental, uma nova rodada de simulações em todos os 12 pontos foi realizada para a obtenção dos resultados do trabalho, com parâmetros $T = 1000h$, descontando as primeiras $I = 100$ horas para o *warm-up* do modelo e com 30 replicações. Cada resposta R_{kr} obtida pelos experimentos ($k = 1, \dots, 12$ e $r = 1, \dots, 30$) foi analisada quanto ao indicador de desempenho de estoques ψ_1 , visto que o valor mínimo de nível de serviço já se encontra contemplado nos parâmetros θ^*_k .

QUADRO 21 – PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTOS

| SCPP | Fator flexibilidade | | Cenário | Ponto experimental |
|--|---------------------|---|---------|--------------------|
| | A | B | | |
| Sistema de Controle Kanban | - | - | 1 | 1 |
| | - | + | 2 | 2 |
| | + | - | 3 | 3 |
| | + | + | 4 | 4 |
| Sistema de Controle Kanban Estendido (dedicado) | - | - | 1 | 5 |
| | - | + | 2 | 6 |
| | + | - | 3 | 7 |
| | + | + | 4 | 8 |
| Sistema de Controle Kanban Estendido (compartilhado) | - | - | 1 | 9 |
| | - | + | 2 | 10 |
| | + | - | 3 | 11 |
| | + | + | 4 | 12 |

Fonte: o autor (2019).

Devido à realização de múltiplas replicações para cada simulação, além do valor médio de estoques para cada cenário experimentado foram construídos intervalos de confiança t de *student* para os valores com nível $\alpha = 5\%$. Para avaliar o impacto da flexibilidade no desempenho de cada SCPP, foi realizado também o cálculo e construção de gráfico para visualização dos efeitos estatísticos principais dos fatores quantidade de produtos e heterogeneidade de tempo de processamento. O efeito principal e_i de um fator i mede a alteração média na resposta (nível de estoques) devido ao movimento do fator i entre seus diferentes níveis, com essa média sendo tomada sobre todas as combinações possíveis dos outros fatores (LAW, 2014). Além disso, é possível que ambos os fatores de flexibilidade possuam interação, *i.e.*,

o efeito de um fator de flexibilidade dependa de alguma forma do nível do outro fator de flexibilidade. Para averiguar essa possibilidade, foi realizado o cálculo e construção de gráfico para visualização do efeito de interação entre os 2 fatores de flexibilidade. As fórmulas para o cálculo dos efeitos principais e de interação após o término de uma replicação, exemplificados somente para o SCK, são explicitadas no QUADRO 22.

QUADRO 22 – CÁLCULO EFEITOS PRINCIPAIS E DE INTERAÇÃO PARA O SISTEMA DE CONTROLE KANBAN

| Efeito | Notação | Cálculo para uma replicação |
|---|----------|------------------------------------|
| Efeito principal fator A (quantidade de tipos de produtos) | e_A | $\frac{-R_1 - R_2 + R_3 + R_4}{2}$ |
| Efeito principal fator B (heterogeneidade de tempo de processamento) | e_B | $\frac{-R_1 + R_2 - R_3 + R_4}{2}$ |
| Efeito de interação entre os fatores de flexibilidade | e_{AB} | $\frac{R_4 - R_2 - R_3 + R_1}{2}$ |

Fonte: o autor (2019).

Devido a utilização de variáveis aleatórias, os efeitos observados para um experimento podem ser originados por flutuação amostral e não conter significância estatística. Na literatura de planejamento de experimentos, a determinação da significância estatística dos resultados é usualmente endereçada através da realização de uma análise de variância (ANOVA) (MONTGOMERY, 2001; ROY, 2001). Contudo, o uso desta técnica para estudos de simulação é desaconselhado por Law (2014), visto que, de forma geral, não é adequado assumir igual variação para a população em cada configuração do planejamento de experimentos. No lugar da ANOVA, os autores sugerem a realização de replicações para a construção de um intervalo de confiança para os resultados, a partir de uma distribuição *t* de *student*. Se o intervalo de confiança não conter o valor 0, é concluído que o efeito é significativo estatisticamente.

A construção dos intervalos de confiança segue os seguintes passos, conforme Law (2014). Para as $r = 1, \dots, 30$ replicações, tomando e_{ir} como o efeito principal do fator i calculado na replicação r (de acordo com a fórmula apresentada no QUADRO 22), pode-se calcular um efeito principal médio \bar{e}_i entre todas as replicações conforme

apresentado em (17), bem como a variância S_i^2 entre os efeitos principais das diferentes replicações, como é mostrado em (18).

$$\bar{e}_i = \frac{\sum_{r=1}^{30} e_{ir}}{30} \quad (17)$$

$$S_i^2 = \frac{\sum_{r=1}^{30} [e_{ir} - \bar{e}_i]^2}{29} \quad (18)$$

A partir disso, um intervalo de confiança de $100(1 - \alpha)\%$ pode ser calculado por (19). A construção do intervalo de confiança para os efeitos de interação segue o mesmo protocolo.

$$\bar{e}_i \pm t_{r-1, 1-\alpha/2} \sqrt{S_i^2} \quad (19)$$

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Em primeiro lugar, as otimizações de parâmetros iniciais para cada SCPP são apresentadas e têm sua qualidade discutida (seção 4.1). Em seguida, os parâmetros otimizados são discutidos (seção 4.2). Os resultados de nível de estoque observados nos SCPP, nos diferentes cenários estudados, são apresentados na seção 4.3. Por fim, na seção 4.4 o efeito da flexibilidade em cada SCPP é calculado. As notações ‘-’ e ‘+’, ou ‘baixo’ e ‘alto’ são utilizadas para referenciar um fator que se encontra no nível 1 e 2, respectivamente. As tabelas detalhadas dos resultados por replicação se encontram no APÊNDICE 6.

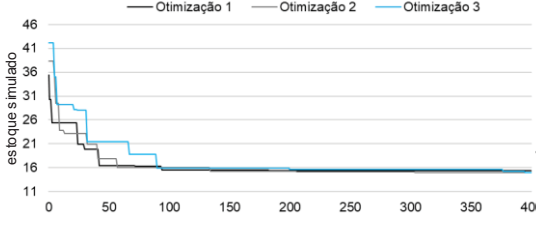
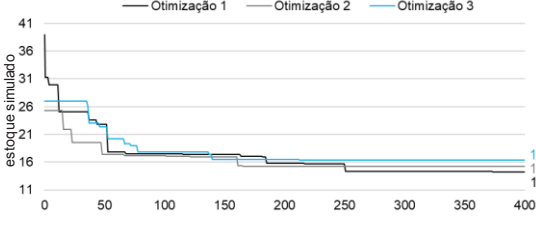
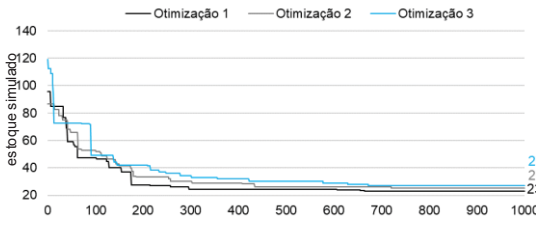
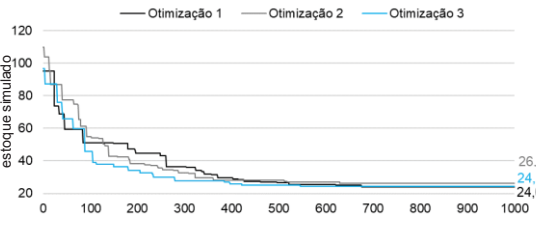
4.1 RESULTADOS DA OTIMIZAÇÃO DOS PARÂMETROS

As configurações do AG para cada cenário, definidas após análise de sensibilidade, se encontram no QUADRO 23 para o SCK; no QUADRO 24 para o SCKE-D e no QUADRO 25 para o SCKE-C. Nos quadros, ainda, são apresentadas as curvas de convergência e coeficiente de variação da qualidade da melhor solução encontrada nas 3 rodadas de otimização do algoritmo para cada cenário. Por fim, os quadros também exibem a configuração otimizada dos parâmetros s e c (somente para os SCKE), a qual corresponde à melhor solução gerada pelo AG em cada um dos cenários analisados.

As otimizações foram conduzidas de maneira robusta, independente da qualidade das soluções observadas nas gerações iniciais de execução do AG. Para o SCK, o CV da qualidade da melhor solução encontrada nas rodadas de otimização ficou abaixo de 7% para os 4 cenários de flexibilidade estudados. No caso do SCKE-D os CV calculados sempre apresentaram valor abaixo de 4%. Já para o SCKE-C, os CV se situaram abaixo dos 3% para 3 dos 4 cenários, e abaixo dos 7% para o cenário restante. Nenhum dos CV calculados correspondem nem a 3 unidades de estoque de variação nas soluções encontradas.

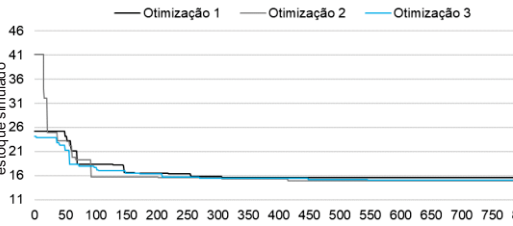
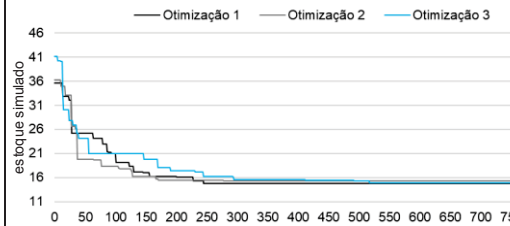

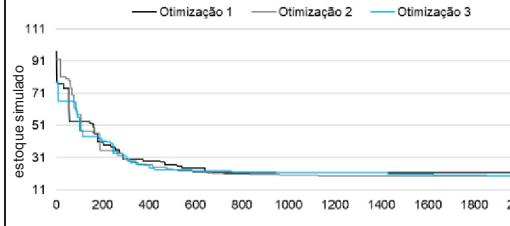
Quanto à configuração do AG: os parâmetros de maior magnitude para tamanho de população, número de gerações, quantidade de proles concebidas por geração e valor do termo de penalização ã obtiveram os melhores resultados em todos os experimentos. O método de crossover *uniforme* obteve os melhores resultados em todos os experimentos.

QUADRO 23 – RESULTADO DE OTIMIZAÇÃO DO SISTEMA DE CONTROLE KANBAN

| SISTEMA DE CONTROLE KANBAN | |
|--|--|
| <p><i>Cenário 1: 2 produtos manufacturados com nível de heterogeneidade de 10%</i></p> <p>Parâmetros AG: nº indivíduos: 40 nº gerações: 400 Método de crossover: uniforme Probabilidade de mutação: dinâmica (7,5% - 2,5%) elitismo: 34</p> <p>Robustez da otimização CV(%): 1,17% Curvas de convergência do AG:</p>  <p>Configuração otimizada do parâmetro s : [[1, 1], [8, 8]]*</p> <p>* [[si1, ... sM1], [si2, ..., sM2]]</p> | <p><i>Cenário 2: 2 produtos manufacturados com nível de heterogeneidade de 100%</i></p> <p>Parâmetros AG: nº indivíduos: 40 nº gerações: 400 Método de crossover: uniforme Probabilidade de mutação: dinâmica (7,5% - 2,5%) elitismo: 34</p> <p>Robustez da otimização CV(%): 5,62% Curvas de convergência do AG:</p>  <p>Configuração otimizada do parâmetro s : [[2, 1], [4, 10]]*</p> <p>* [[si1, ... sM1], [si2, ..., sM2]]</p> |
| <p><i>Cenário 3: 5 produtos manufacturados com nível de heterogeneidade de 10%</i></p> <p>Parâmetros AG: nº indivíduos: 100 nº gerações: 1000 Método de crossover: uniforme Probabilidade de mutação: dinâmica (3% - 1%) elitismo: 94</p> <p>Robustez da otimização CV(%): 6,43% Curvas de convergência do AG:</p>  <p>Configuração otimizada do parâmetro s : [[1, 1, 1, 1, 1], [4, 4, 4, 4, 4]]*</p> <p>* [[si1, ... sM1], [si2, ..., sM2]]</p> | <p><i>Cenário 4: 5 produtos manufacturados com nível de heterogeneidade de 100%</i></p> <p>Parâmetros AG: nº indivíduos: 100 nº gerações: 1000 Método de crossover: uniforme Probabilidade de mutação: dinâmica (3% - 1%) elitismo: 94</p> <p>Robustez da otimização CV(%): 4,34% Curvas de convergência do AG:</p>  <p>Configuração otimizada do parâmetro s : [[1, 1, 1, 1, 1], [4, 4, 4, 5, 4]]*</p> <p>* [[si1, ... sM1], [si2, ..., sM2]]</p> |

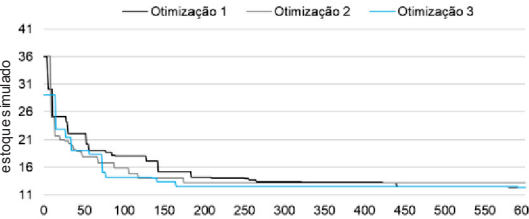
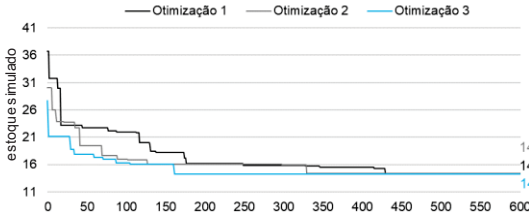
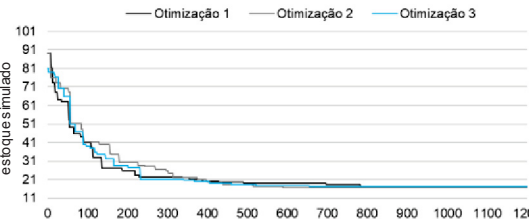
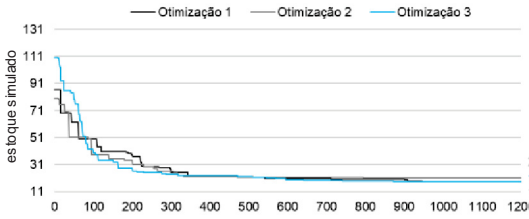
Fonte: o autor (2019).

QUADRO 24 – RESULTADO DE OTIMIZAÇÃO DO SISTEMA DE CONTROLE KANBAN ESTENDIDO DEDICADO

| SISTEMA DE CONTROLE KANBAN ESTENDIDO - DEDICADO | |
|---|---|
| <p><i>Cenário 1: 2 produtos manufacturados com nível de heterogeneidade de 10%</i></p> <p>Parâmetros AG: nº indivíduos: 80 nº gerações: 800 Método de crossover: uniforme Probabilidade de mutação: dinâmica (3,75% - 1,25%) elitismo: 74</p> <p>Robustez da otimização CV(%): 1,93% Curvas de convergência do AG:</p>  <p>Configuração otimizada dos parâmetro s e c : s = [[0, 0], [8, 10]]* ; c = [[1, 1], [17, 25]]** * [[si1, ... sM1], [si2, ..., sM2]] ** [[ci1, ... cM1], [ci2, ..., cM2]]</p> | <p><i>Cenário 2: 2 produtos manufacturados com nível de heterogeneidade de 100%</i></p> <p>Parâmetros AG: nº indivíduos: 80 nº gerações: 800 Método de crossover: uniforme Probabilidade de mutação: dinâmica (3,75% - 1,25%) elitismo: 74</p> <p>Robustez da otimização CV(%): 1,51% Curvas de convergência do AG:</p>  <p>Configuração otimizada dos parâmetro s e c : s = [[0, 1], [8, 8]]* ; c = [[22, 0], [2, 8]]** * [[si1, ... sM1], [si2, ..., sM2]] ** [[ci1, ... cM1], [ci2, ..., cM2]]</p> |
| <p><i>Cenário 3: 5 produtos manufacturados com nível de heterogeneidade de 10%</i></p> <p>Parâmetros AG: nº indivíduos: 200 nº gerações: 2000 Método de crossover: uniforme Probabilidade de mutação: dinâmica (1,50% - 0,50%) elitismo: 194</p> <p>Robustez da otimização CV(%): 1,30% Curvas de convergência do AG:</p>  <p>Configuração otimizada dos parâmetro s e c : s = [[0, 0, 0, 0, 0], [4, 4, 4, 4, 4]]* ; c = [[6, 2, 1, 2, 8], [29, 7, 20, 5, 29]]** * [[si1, ... sM1], [si2, ..., sM2]] ** [[ci1, ... cM1], [ci2, ..., cM2]]</p> | <p><i>Cenário 4: 5 produtos manufacturados com nível de heterogeneidade de 100%</i></p> <p>Parâmetros AG: nº indivíduos: 200 nº gerações: 2000 Método de crossover: uniforme Probabilidade de mutação: dinâmica (1,50% - 0,50%) elitismo: 194</p> <p>Robustez da otimização CV(%): 3,86% Curvas de convergência do AG:</p>  <p>Configuração otimizada dos parâmetro s e c : s = [[0, 0, 0, 0, 0], [4, 4, 4, 4, 5]]* ; c = [[16, 26, 28, 1, 1], [21, 8, 27, 25, 25]]** * [[si1, ... sM1], [si2, ..., sM2]] ** [[ci1, ... cM1], [ci2, ..., cM2]]</p> |

Fonte: o autor (2019).

QUADRO 25 – RESULTADO DE OTIMIZAÇÃO DO SISTEMA DE CONTROLE KANBAN ESTENDIDO COMPARTILHADO

| SISTEMA DE CONTROLE KANBAN ESTENDIDO - COMPARTILHADO | |
|--|---|
| <p><i>Cenário 1: 2 produtos manufaturados com nível de heterogeneidade de 10%</i></p> <p>Parâmetros AG: nº indivíduos: 60 nº gerações: 600 Método de crossover: uniforme Probabilidade de mutação: dinâmica (5% - 1,67%) elitismo: 54</p> <p>Robustez da otimização CV(%): 2,72% Curvas de convergência do AG:</p>  <p>Configuração otimizada dos parâmetro s e c : $s = [[0, 0], [8, 8]]^*$; $c = [1, 29]^{**}$</p> <p>* [[si1, ... sM1], [si2, ..., sM2]] ** [c1, c2]</p> | <p><i>Cenário 2: 2 produtos manufaturados com nível de heterogeneidade de 100%</i></p> <p>Parâmetros AG: nº indivíduos: 60 nº gerações: 600 Método de crossover: uniforme Probabilidade de mutação: dinâmica (5% - 1,67%) elitismo: 54</p> <p>Robustez da otimização CV(%): 0,34% Curvas de convergência do AG:</p>  <p>Configuração otimizada dos parâmetro s e c : $s = [[0, 1], [10, 9]]^*$; $c = [0, 15]^{**}$</p> <p>* [[si1, ... sM1], [si2, ..., sM2]] ** [c1, c2]</p> |
| <p><i>Cenário 3: 5 produtos manufaturados com nível de heterogeneidade de 10%</i></p> <p>Parâmetros AG: nº indivíduos: 120 nº gerações: 1200 Método de crossover: uniforme Probabilidade de mutação: dinâmica (2,50% - 0,83%) elitismo: 114</p> <p>Robustez da otimização CV(%): 2,13% Curvas de convergência do AG:</p>  <p>Configuração otimizada dos parâmetro s e c : $s = [[0, 0, 0, 0, 0], [4, 4, 4, 4, 4]]^*$; $c = [1, 7]^{**}$</p> <p>* [[si1, ... sM1], [si2, ..., sM2]] ** [c1, c2]</p> | <p><i>Cenário 4: 5 produtos manufaturados com nível de heterogeneidade de 100%</i></p> <p>Parâmetros AG: nº indivíduos: 120 nº gerações: 1200 Método de crossover: uniforme Probabilidade de mutação: dinâmica (2,50% - 0,83%) elitismo: 114</p> <p>Robustez da otimização CV(%): 6,97% Curvas de convergência do AG:</p>  <p>Configuração otimizada dos parâmetro s e c : $s = [[0, 0, 0, 0, 0], [5, 4, 5, 4, 4]]^*$; $c = [1, 18]^{**}$</p> <p>* [[si1, ... sM1], [si2, ..., sM2]] ** [c1, c2]</p> |

Fonte: o autor (2019).

4.2 ANÁLISE DOS PARÂMETROS OTIMIZADOS

Os parâmetros determinados para cada um dos SCPP restringem a quantidade de estoque que pode ser gerada no processo produtivo. Portanto, as estratégias de alocação de parâmetros adotadas nos diferentes cenários estão diretamente

relacionadas aos indicadores de desempenho de estoques que foram obtidos durante os experimentos, e que são analisados em detalhe a partir da seção 4.3. A observação da alocação otimizada destes parâmetros (por produto e por estágio) permite elucidar como a estratégia de alocação se altera em resposta ao nível de flexibilidade do sistema.

4.2.1 Parâmetros Sistema de Controle Kanban

Para o SCK, a alocação otimizada dos parâmetros de estoque base s é detalhada no QUADRO 26. A figura ainda apresenta os percentuais de diferença na alocação dos parâmetros entre cenários distintos. Uma escala de cores é utilizada para auxiliar na identificação dos pontos de concentração de estoque base.

QUADRO 26 – CONFIGURAÇÃO OTIMIZADA DOS PARÂMETROS DE ESTOQUE BASE DO SISTEMA DE CONTROLE KANBAN

SISTEMA DE CONTROLE FINANCEIRO

| Cenário 1 -- | | Cenário 2 - + | | Cenário 3 + - | | Cenário 4 ++ | | |
|-----------------------------------|-----------|------------------------------------|-----------|-----------------------------------|-----------|------------------------------------|-----------|-----------|
| 2 produtos 10% heterogeneidade | | 2 produtos 100% heterogeneidade | | 5 produtos 10% heterogeneidade | | 5 produtos 100% heterogeneidade | | |
| Estoque base (sij) | Estágio 1 | Estágio 2 | Estágio 1 | Estágio 2 | Estágio 1 | Estágio 2 | Estágio 1 | Estágio 2 |
| Produto 1 | 1 | 8 | 2 | 4 | 1 | 4 | 1 | 4 |
| Produto 2 | 1 | 8 | 1 | 10 | 1 | 4 | 1 | 4 |
| Produto 3 | - | - | - | - | 1 | 4 | 1 | 4 |
| Produto 4 | - | - | - | - | 1 | 4 | 1 | 5 |
| Produto 5 | - | - | - | - | 1 | 4 | 1 | 4 |
| Total estágio | 2 | 16 | 3 | 14 | 5 | 20 | 5 | 21 |
| Total cenário | 18 | | 17 | | 25 | | 26 | |

| Alteração cenário 1 → cenário 2 | | Alteração cenário 1 → cenário 3 | | Alteração cenário 2 → cenário 4 | | Alteração cenário 3 → cenário 4 | | |
|---|-----------|---|-----------|--|-----------|--|-----------|----|
| Aumento heterogeneidade com baixa quantidade | | Aumento quantidade com baixa heterogeneidade | | Aumento quantidade com alta heterogeneidade | | Aumento heterogeneidade com alta quantidade | | |
| Estágio 1 | Estágio 2 | Estágio 1 | Estágio 2 | Estágio 1 | Estágio 2 | Estágio 1 | Estágio 2 | |
| % alteração | 50% | -13% | 150% | 25% | 67% | 50% | 0% | 5% |
| % alteração | -6% | | 39% | | 53% | | 4% | |

Fonte: o autor (2019).

Analisando a alocação de estoque base definida após o processo de otimização observa-se que a configuração adotada envolve o dimensionamento de um *buffer* (excedente de estoque) ao final do processo para absorver a variabilidade da taxa de demanda. Além disso, há alocação mínima de estoques entre os 2 estágios produtivos para a garantia de fluxo (apenas 1 unidade de estoque base em todos os cenários com exceção do cenário 2 onde foram dimensionadas 2 unidades). Para a manutenção desta estratégia em um ambiente com maior quantidade de produtos, independente da redução da taxa de demanda individual de cada tipo de produto, o sistema é obrigado a aumentar os estoques após o primeiro estágio. Tanto nas transições de estágio 1 para 3 (aumento da quantidade de produtos em baixa heterogeneidade) quanto 2 para 4 (aumento da quantidade de produtos em alta heterogeneidade), o aumento de alocação de estoque base após o primeiro processo aumentou em 150% e 67%, respectivamente. Os tamanhos dos *buffers* de estoque - por produto - após o último processo foram reduzidos devido a redução das taxas de demanda individuais, mas não na mesma proporção do aumento na quantidade de produtos. Desta forma, a alocação de estoque base após o último processo também teve um aumento de 25% e 50%, nas transições de estágio 1 para 3 e 2 para 4, respectivamente.

4.2.2 Parâmetros Sistema de Controle Kanban Estendido Dedicado

No caso dos SCKE, tanto para PDK-D quanto PDK-C, além dos parâmetros de estoque base s , também há a parametrização de um número de Kanbans disponíveis c em cada estágio de manufatura. Para o SCKE-D, uma quantidade de cartões é associada a um tipo específico de produto; já no caso do SCKE-C, os cartões autorizam a produção de qualquer um dos tipos de produto manufaturados. A alocação otimizada dos parâmetros s do SCKE-D é detalhada no QUADRO 27. De forma semelhante à análise conduzida para o SCK, uma escala de cores é utilizada para auxiliar na identificação dos pontos de concentração de estoque base.

Alterações de heterogeneidade não foram traduzidas em mudanças bruscas nos níveis de estoque base parametrizado (redução de 6% do cenário 1 para o 2, em baixa quantidade; aumento de 5% do cenário 3 para o 4, em alta quantidade). Já os aumentos na quantidade de produtos manufaturados observados entre as transições de cenário 1 a 3 e 2 a 4 levaram à alocação de um nível superior de estoque base,

porém de maneira menos agressiva do que observado anteriormente no SCK (aumento de 11% e 24%, respectivamente). Diferentemente do que ocorreu com o SCK, esse aumento nas quantidades parametrizadas se concentrou nos estoques base localizados após o último estágio produtivo, visto que a alocação de estoques para o primeiro estágio se manteve zerada na maioria dos cenários.

QUADRO 27 – CONFIGURAÇÃO OTIMIZADA DOS PARÂMETROS DE ESTOQUE BASE DO SISTEMA DE CONTROLE KANBAN ESTENDIDO DEDICADO

| Estoque base (sij) | Cenário 1 -- | | Cenário 2 - + | | Cenário 3 + - | | Cenário 4 ++ | |
|--------------------|---|-----------|---|-----------|--|-----------|--|-----------|
| | 2 produtos 10% heterogeneidade | | 2 produtos 100% heterogeneidade | | 5 produtos 10% heterogeneidade | | 5 produtos 100% heterogeneidade | |
| | Estágio 1 | Estágio 2 | Estágio 1 | Estágio 2 | Estágio 1 | Estágio 2 | Estágio 1 | Estágio 2 |
| Produto 1 | 0 | 8 | 0 | 8 | 0 | 4 | 0 | 4 |
| Produto 2 | 0 | 10 | 1 | 8 | 0 | 4 | 0 | 4 |
| Produto 3 | - | - | - | - | 0 | 4 | 0 | 4 |
| Produto 4 | - | - | - | - | 0 | 4 | 0 | 4 |
| Produto 5 | - | - | - | - | 0 | 4 | 0 | 5 |
| Total estágio | 0 | 18 | 1 | 16 | 0 | 20 | 0 | 21 |
| Total cenário | 18 | | 17 | | 20 | | 21 | |
| | Alteração cenário 1 → cenário 2 | | Alteração cenário 1 → cenário 3 | | Alteração cenário 2 → cenário 4 | | Alteração cenário 3 → cenário 4 | |
| | Aumento heterogeneidade com baixa quantidade | | Aumento quantidade com baixa heterogeneidade | | Aumento quantidade com alta heterogeneidade | | Aumento heterogeneidade com alta quantidade | |
| | Estágio 1 | Estágio 2 | Estágio 1 | Estágio 2 | Estágio 1 | Estágio 2 | Estágio 1 | Estágio 2 |
| % alteração | - | -11% | - | 11% | -100% | 31% | - | 5% |
| % alteração | -6% | | 11% | | 24% | | 5% | |

Fonte: o autor (2019).

A alocação otimizada dos parâmetros de Kanbans disponíveis é apresentada no QUADRO 28. A utilização do parâmetro *c* permite que o SCKE inicie a operação com uma quantidade de Kanbans já disponíveis, *i.e.*, não atrelados a nenhum produto. Esse desacoplamento parcial entre os cartões de autorização da produção e os níveis de estoque base ao final do estágio permite que o sistema afrouxe as restrições de geração de estoques sem que haja um aumento no nível de estoque base do sistema. Nesse sentido, apesar de apresentar variações menos bruscas na parametrização de *s* durante transições de cenário que envolvem o aumento na quantidade de produtos

manufaturados, a configuração otimizada do SCKE-D apresentou um aumento significativo na alocação de Kanbans disponíveis c (148% de aumento do cenário 1 ao cenário 3 e 456% do cenário 2 ao cenário 4). De forma geral, a concentração dos Kanbans disponíveis foi posicionada no último estágio de produção, com exceção da estratégia adotada para o produto 2 no 4º cenário estudado.

QUADRO 28 – CONFIGURAÇÃO OTIMIZADA DOS PARÂMETROS DE KANBANS DISPONÍVEIS DO SISTEMA DE CONTROLE KANBAN ESTENDIDO DEDICADO

| Cenário 1 -- | | Cenário 2 - + | | Cenário 3 + - | | Cenário 4 ++ | | |
|---|-----------|---|-----------|--|-----------|--|-----------|-----------|
| 2 produtos 10% heterogeneidade | | 2 produtos 100% heterogeneidade | | 5 produtos 10% heterogeneidade | | 5 produtos 100% heterogeneidade | | |
| Cartões kanbans (cij) | Estágio 1 | Estágio 2 | Estágio 1 | Estágio 2 | Estágio 1 | Estágio 2 | Estágio 1 | Estágio 2 |
| Produto 1 | 1 | 17 | 22 | 2 | 6 | 29 | 16 | 21 |
| Produto 2 | 1 | 25 | 0 | 8 | 2 | 7 | 26 | 8 |
| Produto 3 | - | - | - | - | 1 | 20 | 28 | 27 |
| Produto 4 | - | - | - | - | 2 | 5 | 1 | 25 |
| Produto 5 | - | - | - | - | 8 | 29 | 1 | 25 |
| Total estágio | 2 | 42 | 22 | 10 | 19 | 90 | 72 | 106 |
| Total cenário | 44 | | 32 | | 109 | | 178 | |
| Alteração cenário 1 → cenário 2 | | Alteração cenário 1 → cenário 3 | | Alteração cenário 2 → cenário 4 | | Alteração cenário 3 → cenário 4 | | |
| Aumento heterogeneidade com baixa quantidade | | Aumento quantidade com baixa heterogeneidade | | Aumento quantidade com alta heterogeneidade | | Aumento heterogeneidade com alta quantidade | | |
| | Estágio 1 | Estágio 2 | Estágio 1 | Estágio 2 | Estágio 1 | Estágio 2 | Estágio 1 | Estágio 2 |
| % alteração | 1000% | -76% | 850% | 114% | 227% | 960% | 279% | 18% |
| % alteração | -27% | | 148% | | 456% | | 63% | |

Fonte: o autor (2019).

É importante colocar, contudo, que a magnitude do valor parametrizado para c não possui o mesmo efeito do parâmetro s nos resultados simulados de estoque. Foi possível identificar uma série de configurações provenientes da otimização por AG em que parametrizações bastante diferentes para os Kanbans disponíveis resultaram em desempenhos muito semelhantes quanto ao nível médio de estoque simulado. Desta forma, é possível concluir que o principal papel do parâmetro c é permitir que sejam provisionados menores níveis de estoque base, os quais têm grande influência no

desempenho do sistema. Porém, é possível realizar a parametrização de c dentro de uma ampla gama de valores, sem prejuízo para o desempenho observado.

4.2.3 Parâmetros Sistema de Controle Kanban Estendido Compartilhado

Por fim, são analisados em detalhe os parâmetros do SCKE-C. A alocação otimizada dos parâmetros de estoque base pode ser observada no QUADRO 29.

QUADRO 29 – CONFIGURAÇÃO OTIMIZADA DOS PARÂMETROS DE ESTOQUE BASE DO SISTEMA DE CONTROLE KANBAN ESTENDIDO COMPARTILHADO

| Cenário 1 | | Cenário 2 | | Cenário 3 | | Cenário 4 | | |
|---|-----------|---|-----------|--|-----------|--|-----------|-----------|
| -- | | - + | | + - | | ++ | | |
| 2 produtos 10% heterogeneidade | | 2 produtos 100% heterogeneidade | | 5 produtos 10% heterogeneidade | | 5 produtos 100% heterogeneidade | | |
| Estoque base (sij) | Estágio 1 | Estágio 2 | Estágio 1 | Estágio 2 | Estágio 1 | Estágio 2 | Estágio 1 | Estágio 2 |
| | 0 | 8 | 0 | 10 | 0 | 4 | 0 | 5 |
| | 0 | 8 | 1 | 9 | 0 | 4 | 0 | 4 |
| | | | | | 0 | 4 | 0 | 5 |
| | | | | | 0 | 4 | 0 | 4 |
| | | | | | 0 | 4 | 0 | 4 |
| Total estágio | 0 | 16 | 1 | 19 | 0 | 20 | 0 | 22 |
| Total cenário | 16 | | 20 | | 20 | | 22 | |
| Alteração cenário 1 → cenário 2 | | Alteração cenário 1 → cenário 3 | | Alteração cenário 2 → cenário 4 | | Alteração cenário 3 → cenário 4 | | |
| Aumento heterogeneidade com baixa quantidade | | Aumento quantidade com baixa heterogeneidade | | Aumento quantidade com alta heterogeneidade | | Aumento heterogeneidade com alta quantidade | | |
| | Estágio 1 | Estágio 2 | Estágio 1 | Estágio 2 | Estágio 1 | Estágio 2 | Estágio 1 | Estágio 2 |
| % alteração | - | 19% | - | 25% | -100% | 16% | - | 10% |
| % alteração | 25% | | 25% | | 10% | | 10% | |

Fonte: o autor (2019).

Observa-se um aumento de 25% na alocação de estoque base no último estágio de produção na transição de cenário 1 para 2, *i.e.*, aumento de heterogeneidade em baixa quantidade de produtos, a qual não foi observada nas políticas anteriormente analisadas. Desta forma, o total de estoque parametrizado para o cenário 2 se encontra em 20 unidades, nível superior ao dimensionado para os cenários de baixa quantidade de produtos dos outros SCPP. Contudo, a distribuição dos estoques base nos cenários 1, 3 e 4 é muito semelhante ao verificado no SCKE-

otimizados, já discutidos na seção 4.2, são também colocados no quadro para a comparação com os resultados das simulações. Além disso, uma melhor visualização da comparação de desempenho entre os diferentes SCPP pode ser verificada na FIGURA 31. Conforme colocado na seção 3.9, os resultados foram mensurados a partir de 30 replicações de simulação com $T = 1000h$ e $I = 100h$ de período de *warm-up*, com os parâmetros s e c otimizados.

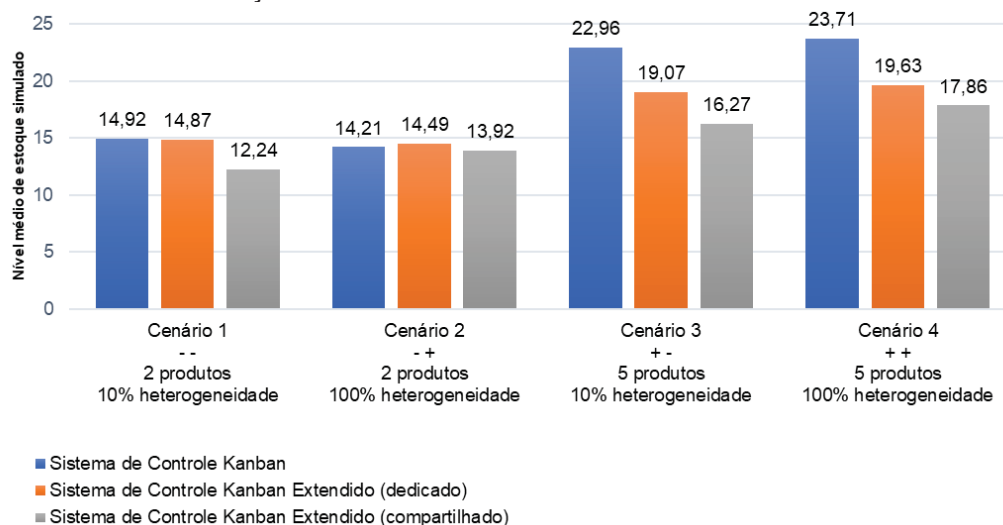
QUADRO 31 – RESULTADOS PARA TODOS OS CENÁRIOS DE FLEXIBILIDADE ANALISADOS

| Planejamento dos experimentos | | | Parâmetros otimizados* | | Resultados experimentos | |
|--|---------|---------|------------------------|---------------------|-------------------------|--|
| SCPP | Fator A | Fator B | Total parâmetro s | Total parâmetro c | Nível de estoque | Intervalo de confiança estoque ($\alpha=0.05$) |
| Sistema de Controle Kanban | - | - | 18 | - | 14,92 | [14,85 ; 14,98] |
| | - | + | 17 | - | 14,21 | [14,15 ; 14,27] |
| | + | - | 25 | - | 22,96 | [22,90 ; 23,01] |
| | + | + | 26 | - | 23,71 | [23,65 ; 23,76] |
| Sistema de Controle Kanban Estendido (dedicado) | - | - | 18 | 44 | 14,87 | [14,79 ; 14,94] |
| | - | + | 17 | 32 | 14,49 | [14,45 ; 14,54] |
| | + | - | 20 | 109 | 19,07 | [19,04 ; 19,09] |
| | + | + | 21 | 178 | 19,63 | [19,59 ; 19,66] |
| Sistema de Controle Kanban Estendido (compartilhado) | - | - | 16 | 30 | 12,24 | [12,17 ; 12,3] |
| | - | + | 20 | 15 | 13,92 | [13,83 ; 14,02] |
| | + | - | 20 | 8 | 16,27 | [16,21 ; 16,34] |
| | + | + | 22 | 19 | 17,86 | [17,77 ; 17,95] |

* Parâmetros otimizados para minimizar estoques e atingir nível de serviço mínimo de 95%

Fonte: o autor (2019).

FIGURA 31 – COMPARATIVO DE DESEMPENHO DOS SISTEMAS DE CONTROLE DE PRODUÇÃO PUXADO NOS DIFERENTES CENÁRIOS DE FLEXIBILIDADE



Fonte: o autor (2019).

O desempenho do SCKE-C foi superior aos outros sistemas em todos os cenários analisados. Este resultado é coerente com as pesquisas recentes acerca dos SCPP, onde se observa que trabalhos configurados de diferentes formas têm demonstrado a superioridade das políticas de cartão compartilhado em relação às políticas de cartão dedicado (ver seção 2.3.3). Especialmente em condições de alta quantidade de produtos e baixa heterogeneidade, representadas pelo cenário 3, a superioridade do SCKE-C se mostrou mais consolidada com uma diferença de 2,8 unidades de estoque médio em relação à segunda política melhor avaliada. O sistema encontrou maior dificuldade em condições de alta heterogeneidade, como observado nos cenários 2 e 4, onde sua superioridade se limitou a 0,29 e 1,77 unidade de estoque em relação à segunda melhor política.

Quanto aos outros 2 SCPP, em 3 dos 4 cenários, a política SCKE-D foi superior à política clássica SCK. Mais uma vez, o resultado segue a linha das conclusões encontradas na literatura, visto que os SCKE têm obtido melhores resultados que o SCK em indicadores de desempenho de estoque e nível de serviço. Em especial, observa-se que o SCK tem seu desempenho comprometido de forma mais severa que as outras políticas quando há um aumento na quantidade de produtos manufaturados (cenários 3 e 4). Tal fenômeno pode estar relacionado à dependência do SCK ao parâmetro de estoque base s , visto que a política não tem acesso a um parâmetro para a alocação de Kanbans livres, papel desempenhado pelo parâmetro c dos SCKE. Como discutido na seção 4.2, a utilização dos parâmetros c permitiu que os SCKE obtivessem o nível de serviço requerido com uma utilização menor do parâmetro s , resultando em um nível médio de estoque inferior. Contudo, nos cenários de baixa quantidade de produtos, o SCK obteve desempenho muito próximo ao observado nos outros SCPP analisados, apesar da sua simplicidade conceitual. Em especial no cenário 2, onde o sistema de produção foi sujeito a um nível alto de heterogeneidade, o desempenho do SCK superou minimamente o desempenho do SCKE-D, em menos de 1 unidade de estoque médio.

4.4 EFEITO DA FLEXIBILIDADE NOS SISTEMAS PUXADOS

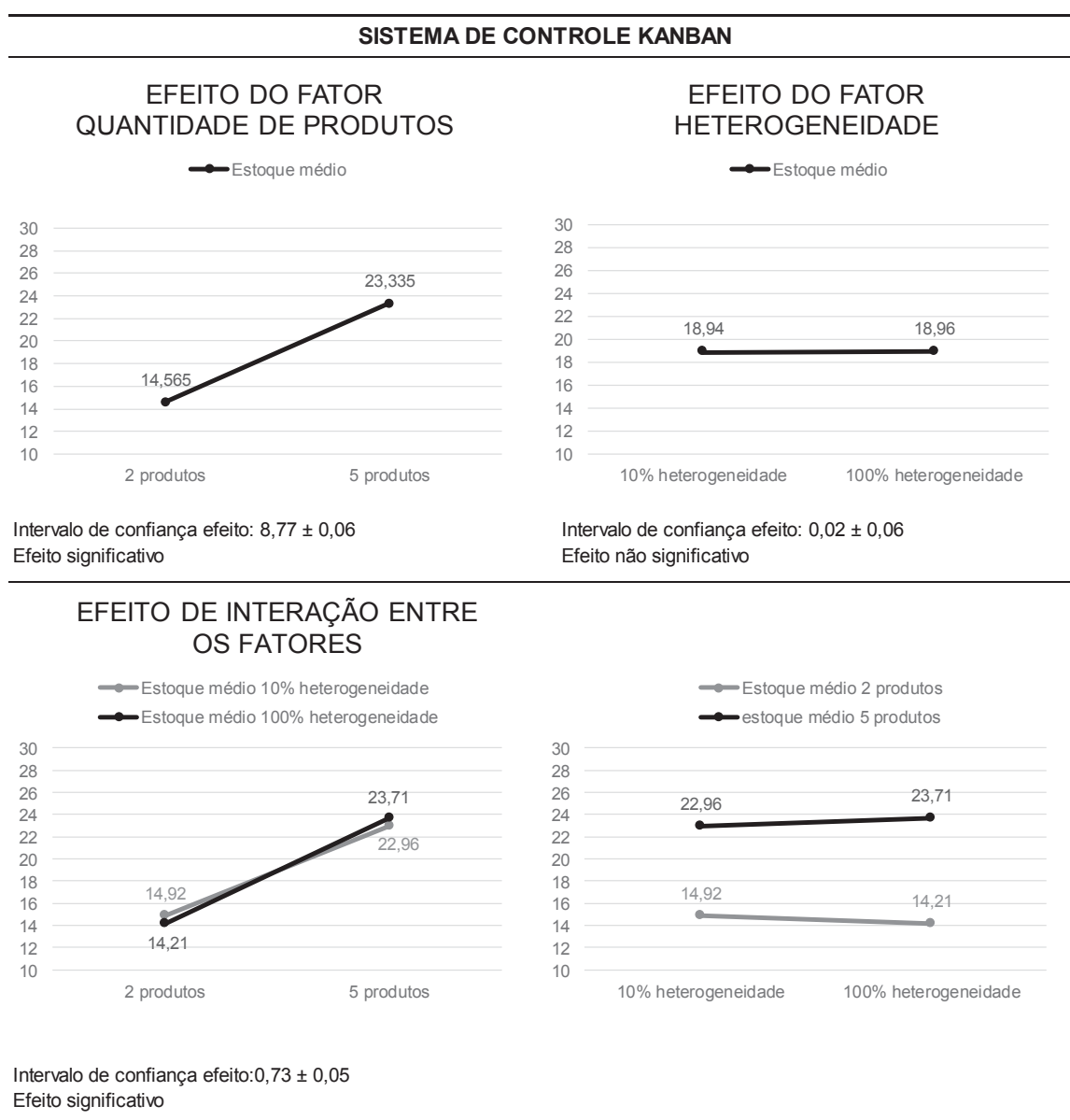
Para observar o efeito de cada fator da flexibilidade no desempenho de estoques dos SCPP, são apresentados nesta seção os efeitos principais e de

interação entre os fatores, a partir dos experimentos de simulação realizados e seguindo o protocolo apresentado na seção 3.9.

4.4.1 Efeito no Sistema de Controle Kanban

Na FIGURA 32 são analisados os efeitos dos fatores para o SCK. Os gráficos auxiliam na visualização do impacto que as transições nos níveis de flexibilidade provocam nos indicadores de nível médio de estoque.

FIGURA 32 – EFEITO DA FLEXIBILIDADE EM UM SISTEMA DE CONTROLE KANBAN



Fonte: o autor (2019).

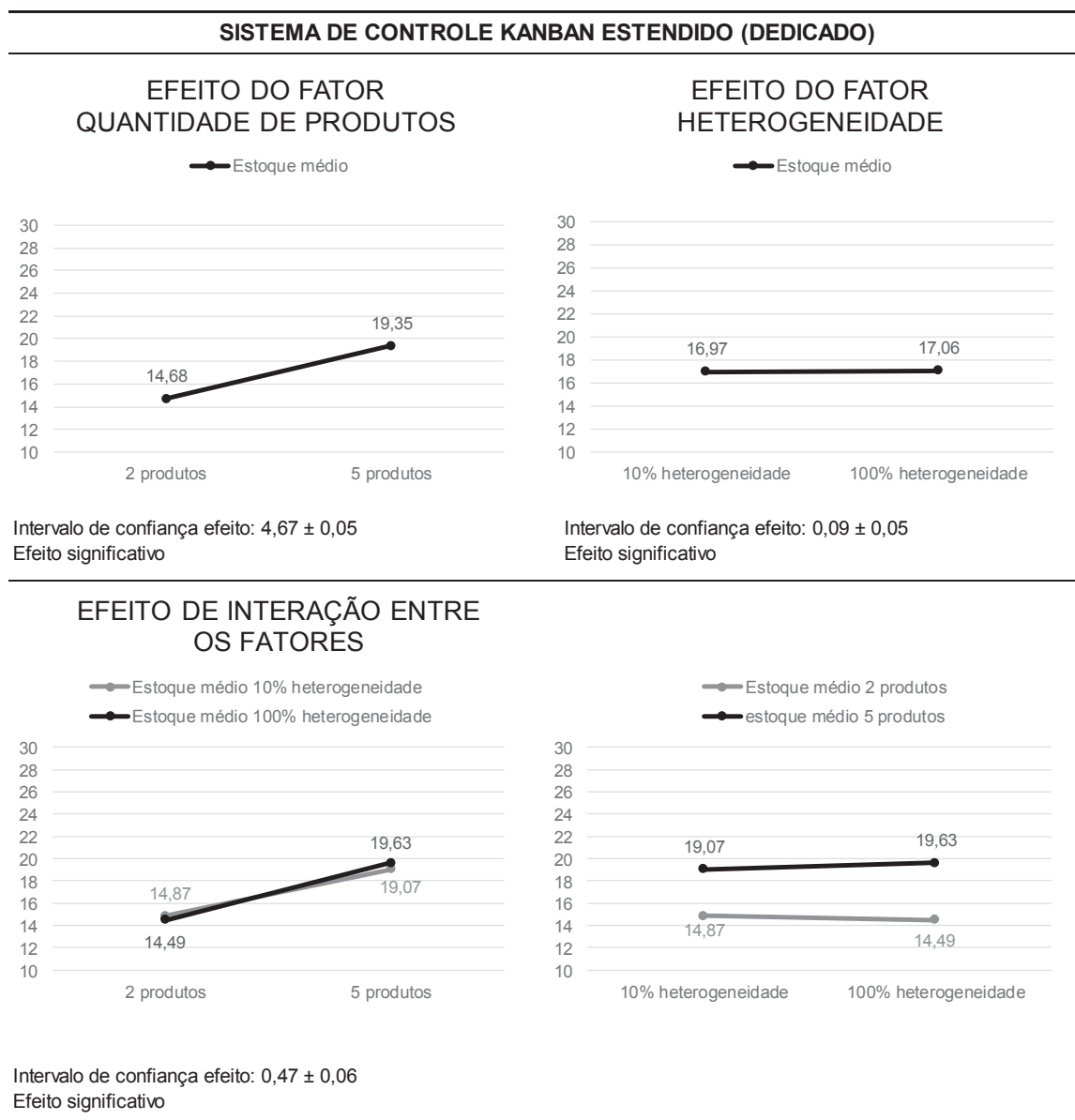
A alteração de níveis do fator quantidade de produtos compromete o desempenho do SCK em 8,77 unidades de estoque médio, dentro de um intervalo de confiança de $\pm 0,06$ ($\alpha=5\%$), sendo este amplamente o principal efeito identificado dentro das delimitações metodológicas deste estudo. A observação do efeito de interação mostra que o sistema apresentou resultado levemente superior com alta heterogeneidade, em baixa quantidade de produtos; o qual é compensado por um resultado levemente inferior com alta heterogeneidade, em alta quantidade de produtos. Apesar da diferença do nível de heterogeneidade representar menos de 1 unidade de estoque médio, tanto em baixa quanto alta quantidade de produtos, o efeito de interação dos fatores foi estatisticamente significativo, a partir da análise do intervalo de confiança. Já o fator heterogeneidade de tempo de processamento apresenta o efeito de menor grandeza, não significativo estatisticamente, visto que o efeito em uma direção quando a quantidade de produtos é baixa é compensado por um efeito de magnitude similar na outra direção, quando a quantidade de produtos é alta. Este fenômeno é chamado de interação cruzada por Grace-Martin (2019).

4.4.2 Efeito no Sistema de Controle Kanban Estendido Dedicado

Os gráficos de efeitos para o SCKE-D são apresentados na FIGURA 33. O aumento do fator quantidade de produtos compromete o desempenho do SCKE-D em uma média de 4,67 unidades de estoque, sendo o efeito de maior destaque observado. Nesse sentido, ainda que a política encontre o desafio semelhante ao encontrado no SCK de manter os estoques baixos quando há aumento na quantidade de produtos manufaturados, o impacto dessa transição de flexibilidade é mais brando no SCKE-D, com um efeito quase 50% mais baixo. Apesar de apresentarem significância estatística devido a valores baixos de variância na condução dos experimentos - os quais possibilitaram a construção de intervalos de confiança estreitos - o efeito do fator heterogeneidade de tempo de processamento e da interação entre os fatores não chegaram a atingir o valor médio de uma única unidade de estoque, tendo efeitos médios calculados de 0,09 e 0,47 unidades de estoque, respectivamente. Mesmo assim, relativamente ao efeito da heterogeneidade observado no SCK, o SCKE-D é afetado de maneira mais severa. Como observado anteriormente, durante a comparação do desempenho dos SCPP, o SCK consegue

inclusive superar o desempenho do SCKE-D em condições de baixa quantidade de tipos de produtos e alta heterogeneidade de tempo de processamento.

FIGURA 33 – EFEITO DA FLEXIBILIDADE EM UM SISTEMA DE CONTROLE KANBAN ESTENDIDO DEDICADO



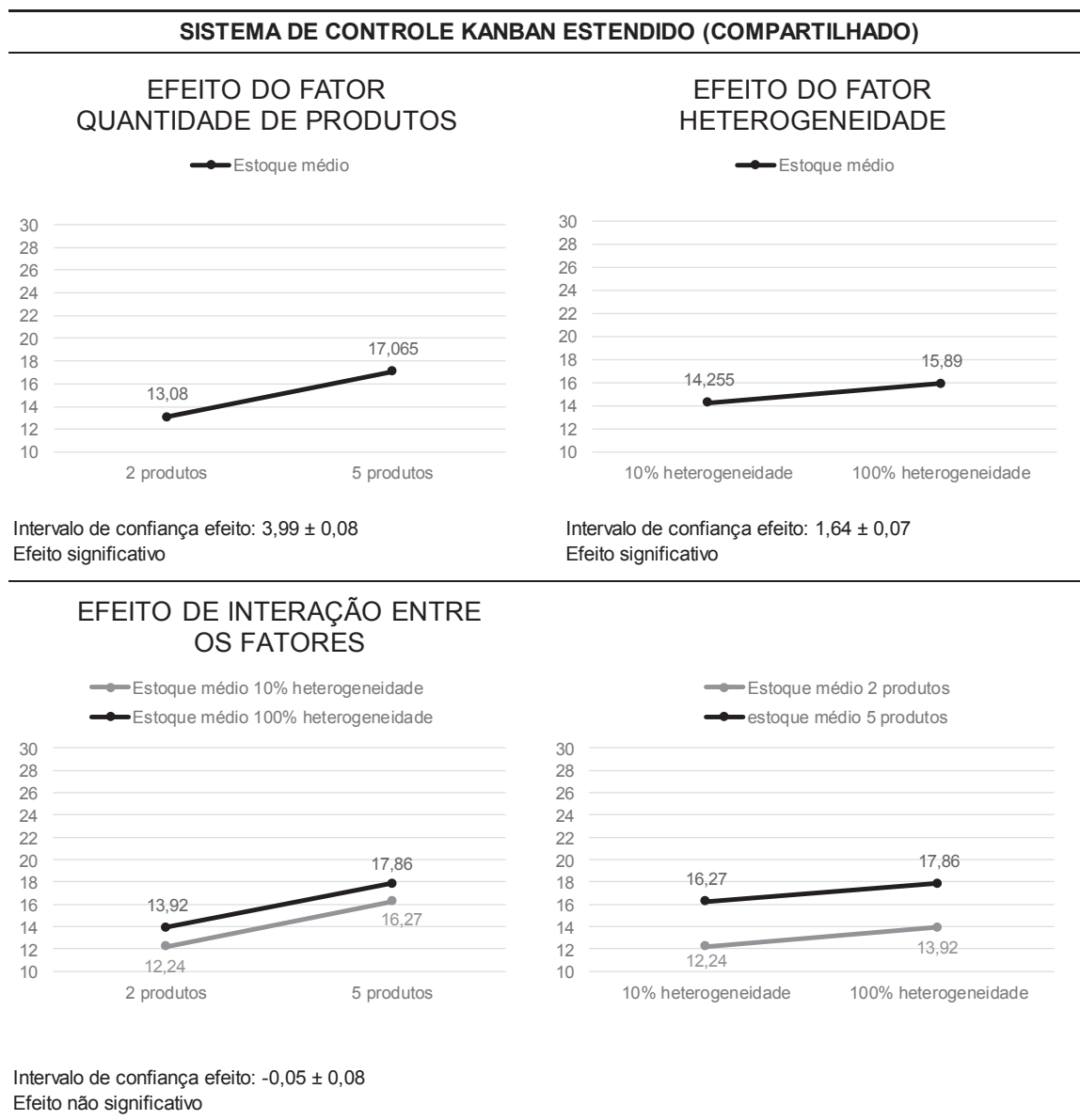
Fonte: o autor (2019).

4.4.3 Efeito no Sistema de Controle Kanban Estendido Compartilhado

Para o SCKE-C, os gráficos dos efeitos dos fatores se encontram na FIGURA 34. O efeito do fator quantidade de produtos ainda se estabelece como o principal efeito observado, apesar de apresentar um impacto inferior ao previamente observado

para o SCK e SCKE-D, comprometendo o nível de estoques em um valor médio de 3,99 unidades.

FIGURA 34 – EFEITO DA FLEXIBILIDADE EM UM SISTEMA DE CONTROLE KANBAN ESTENDIDO COMPARTILHADO



Fonte: o autor (2019).

O efeito da interação entre os fatores não possui efeito significativo, como pode ser observado pelo paralelismo das linhas no gráfico de interação, apresentando um módulo de apenas 0,05 e contendo o valor nulo no intervalo de confiança. Em contrapartida, o efeito do fator heterogeneidade de tempo de processamento encontra um efeito mais severo do que foi observado nas outras políticas estudadas, aumentando o nível de estoques em um valor médio de 1,64 unidade. Mesmo assim,

apesar da queda de desempenho mais significativa a política ainda obteve os melhores resultados. A falta de um parâmetro específico para controlar a quantidade de Kanbans disponíveis de maneira personalizada para cada tipo de produto pode ter comprometido a capacidade do SCKE-C em manter seu desempenho quando as diferenças de tempo de processamento chegam a 100% do valor do tempo médio de processamento de cada estágio.

Conforme observado pela observação dos efeitos e pela comparação apresentada anteriormente na FIGURA 31, os experimentos demonstraram que o SCKE-C é superior especialmente em condições de alta quantidade de produtos e tem sua superioridade limitada especialmente em condições de alta heterogeneidade de tempo de processamento.

5 CONCLUSÃO

A Indústria 4.0 propõe um novo contexto de operações, onde os consumidores exigem personalização de seus produtos, individualização da demanda e flexibilização da produção (LASI, 2014). Apesar das condições reais que vão permear os sistemas de produção da Indústria 4.0 ainda não serem completamente claras, visto que se encontra dificuldade até mesmo para definir o projeto de maneira tangível (HOFMANN e RÜSCH, 2017), uma revisão de literatura do tema permite identificar que essas mudanças estão estreitamente ligadas ao conceito da flexibilidade de *mix* na manufatura, que representa tanto a quantidade quanto a heterogeneidade dos tipos de produtos manufaturados em um sistema de produção (KOSTE e MALHOTRA, 1999). Ao observar o efeito da flexibilidade de *mix* em 3 relevantes SCPP propostos na literatura, por meio de um planejamento de experimentos de simulação em um sistema de produção modelado, foi possível observar que o desempenho dos SCPP sofre efeito significativo em condições de maior exposição à flexibilidade. Neste sentido, os resultados deste trabalho quantificam os efeitos da flexibilidade nos SCPP, para que pesquisadores e gestores possam melhor compreender o impacto da adoção de práticas de planejamento de produção associadas à Indústria 4.0 nos sistemas produtivos vigentes.

O SCK foi o sistema pior avaliado em 3 dos 4 cenários de flexibilidade estudados (cenário1, 3 e 4), e teve seu desempenho especialmente comprometido ao ser operado em ambientes com alta quantidade de produtos manufaturados, devido à utilização de estoques intermediários para cada tipo de produto em suas parametrizações de estoque base. O aumento na quantidade de tipos de produtos manufaturados de 2 para 5 resultou em um aumento médio de 8,77 unidades de estoque médio no sistema. Contudo, o sistema apresentou excepcional desempenho ao ser operado com altos níveis de heterogeneidade em baixas quantidades de produtos, tendo nessas condições o segundo melhor desempenho entre os SCPP testados, a menos de 1 unidade de estoque médio do SCPP melhor avaliado. Nesta perspectiva, os resultados questionam a capacidade desta estratégia de controle em manter baixos níveis de estoque ao operar sistemas de manufatura da Indústria 4.0 que suportem demandas individualizadas com uma alta quantidade de tipos de produtos.

Entre os dois SCKE analisados, a política de cartões compartilhado obteve melhor desempenho do que a política de cartões dedicados em todos os cenários estudados, resultado alinhado com as observações de Onyeocha (2015) e Onyeocha, Khoury e Geraghty (2015) para estudos correlatos. Em especial, o SCKE-C se mostrou o sistema mais resistente à perda de desempenho decorrente de um aumento na quantidade de tipos de produtos, tendo seu estoque médio comprometido em uma média de 3,99 unidades. Por outro lado, a estratégia sofreu o maior efeito da heterogeneidade de tempos de processamento entre os tipos de produtos manufaturados, sendo impactada em um valor médio de 1,64 unidade de estoque por uma transição de heterogeneidade de 10% para 100%.

A realização deste trabalho oferece uma série de oportunidades para trabalhos futuros. Em primeiro lugar, testes semelhantes podem ser conduzidos com a estratégia de controle BK-CONWIP, visto que este sistema tem apresentado bons resultados quando comparado a outros SCPP (ONYEOCHA, 2015). Além disso, o realismo dos efeitos calculados neste trabalho pode ser testado por meio da realização de estudos de caso para diferentes segmentos da indústria, desde que haja disponibilidade de casos excepcionais onde se possa conduzir uma análise desprovida de vieses, principalmente quanto ao índice de utilização de capacidade. Ainda, trabalhos futuros podem conduzir experimentos semelhantes aos propostos neste estudo, porém utilizando uma maior amplitude de níveis para cada um dos fatores da flexibilidade, desde que os pesquisadores consigam superar as barreiras de recurso computacional que entravam a execução de um número maior de simulações.

Mesmo para pesquisas que não envolvam a temática específica deste estudo, trabalhos futuros podem também se beneficiar de algumas estratégias metodológicas propostas no Capítulo 3. Em especial, os estudos conduzidos na seção 3.8 para a construção e ajuste de um algoritmo genético para a otimização dos parâmetros dos SCPP podem auxiliar na compreensão de como o AG pode ser utilizado para a otimização de simulações e o quanto este método pode ser efetivo nestes casos. O autor também espera que as discussões acerca dos desafios do combate ao viés em análises experimentais na Engenharia de Produção contribuam para a criação de estratégias metodológicas cada vez mais robustas e capazes de oferecer à comunidade estudos rigorosos e efetivos.

REFERÊNCIAS

- ACATECH. **Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0**, 2013. Disponível em: <<https://www.din.de/blob/76902/e8cac883f42bf28536e7e8165993f1fd/recommendations-for-implementing-industry-4-0-data.pdf>>. Acesso em: 12 fev. 2019.
- AKSOY, L.; AKYAZI, U. Advanced Topics in Computer Sciences: Genetic Programming. **Notas de aula**, 2019. Disponível em: <<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.205.6853&rep=rep1&type=pdf>>. Acesso em: 11 fev. 2019.
- ALAVI, S. The influence of workforce agility on external manufacturing flexibility of Iranian SMEs. **International Journal of Technological Learning, Innovation and Development**, v. 8, n. 1, p. 111, 2016.
- ALI, M.; WADHWA, S. The effect of routing flexibility on a flexible system of integrated manufacturing. **International Journal of Production Research**, v. 48, n. 19, p. 5691–5709, 2010.
- AL-HAWARI, T.; QASEM, A. G.; SMADI, H. Development and evaluation of a Basestock-CONWIP pull production control strategy in balanced assembly systems. **Simulation Modelling Practice and Theory**, v. 84, p. 83–105, 2018.
- BAI, C.; SARKIS, J. Improving green flexibility through advanced manufacturing technology investment: Modeling the decision process. **International Journal of Production Economics**, v. 188, p. 86–104, 2017.
- BANKS, J. **Handbook of Simulation**. 1. ed. EUA: John Wiley & Sons, inc, 1998.
- BAYNAT, B.; BUZACOTT, J. A.; DALLERY, Y. Multiproduct Kanban-like Control Systems. **International Journal of Production Research**. v. 40, n. 16, p. 4225 – 4255, 2002.
- BERTRAND, J.; FRANSOO, J. C. Operations management research methodologies using quantitative modeling. **International Journal of Operations & Production Management**, v. 22, n. 2, p. 241–264, 2002.
- BONVIK, A. M.; COUCH, C. E.; GERSHWIN, S. B. A comparison of production-line control mechanisms. **International Journal of Production Research**, v. 35, n. 3, p. 789–804, 1997.
- BOKHORST, J. A. C.; SLOMP, J. Lean Production Control at a High-Variety, Low-Volume Parts Manufacturer. **Interfaces**. v. 40, n. 4, p. 303 – 312, 2010.
- BOTHA, T., THERON, P. **How are companies around the world really embracing digital?**, 2016. Disponível em: <<https://bit.ly/2Hf5q7S>>. Acesso em: 17 set. 2017.
- BROWNE, J.; DUBOIS, D.; RATHMILL, K.; SETHI, S. P.; STECKE, K. E. Classification of flexible manufacturing systems. **FMS Magazine**, v. 2, p. 114–117, 1984.

BRYNJOLFSSON, E.; ROCK, D.; SYVERSON, C.; et al. Nber Working Paper Series Artificial Intelligence and the Modern Productivity Paradox: a Clash of Expectations and Statistics. **National Bureau of Economic Research**, 2017.

BUZACOTT, J. A. Queueing models of Kanban and MRP controlled production systems. **Engineering Costs Production Economics**, v. 17, n. 1, p. 3–20, 1989.

CHANG, A. Y. Prioritising the types of manufacturing flexibility in an uncertain environment. **International Journal of Production Research**, v. 50, n. 8, p. 2133–2149, 2012.

CHEN, C. S. Concurrent Engineer-To-Order operation in the Manufacturing Engineering Contracting industries. **International Journal of Industrial and Systems Engineering**, v. 1, n. 1–2, p. 37–58, 2006.

CHEN, I.; CALANTONE, R.; CHUNG, C. H. The marketing-manufacturing interface and manufacturing flexibility. **Omega**, v. 20, n. 4, p. 431–443, 1992.

COLOMBO, A. W.; KARNOUSKOS, S.; KAYNAK, O.; SHU, Y.; YIN, S. Industrial Cyberphysical Systems. **IEEE Industrial Electronics Magazine**, p. 6 – 16, 2017.

CRESWELL, J. W.; **Research Design Qualitative Quantitative and Mixed Methods Approaches**. Reino Unido: SAGE Publications, 1994.

CSIS. **Made in China 2025**, 2015. Disponível em: <<https://bit.ly/2dpvJKF>>. Acesso em: 12 fev. 2019.

DALLERY, W.; LIBEROPOULOS, G. Extended kanban control system: Combining kanban and base stock. **IIE Transactions (Institute of Industrial Engineers)**, v. 32, n. 4, p. 369–386, 2000.

DB. **Industry 4.0: Upgrading of Germany's industrial capabilities on the horizon**, 2014. Disponível em: < https://www.dbresearch.com/PROD/RPS_EN-PROD/Industry_4_0%3A_Upgrading_of_Germany%E2%80%99s_industrial_ca/RPS_EN_DOC_VIEW.calias?rwnode=PROD0000000000435629&ProdCollection=PROD0000000000451959 >. Acesso em: 12 fev. 2019.

DFKI. **Industry 4.0: The Semantic Product Memory as a Basis for Cyber-Physical Production Systems**, 2013. Disponível em: < <https://bit.ly/2HqRq8U> >. Acesso em: 17 set. 2017.

EEF. **The 4th Industrial Revolution a Primer for Manufacturers**, 2016. Disponível em: < <https://bit.ly/2gF2sd6> >. Acesso em: 12 fev. 2019.

ESMAEILIAN, B.; BEHDAD, S.; WANG, B. The evolution and future of manufacturing : A review. **Journal of Manufacturing Systems**, v. 39, p. 79–100, 2016.

FISHER, M. L.; ITTNER, C. D. The Impact of Product Variety on Automobile Assembly Operations: Empirical Evidence and Simulation Analysis. **Management Science**, v.45,

n.6, p. 771-786, 1999

GRACE-MARTIN, K. Interpreting Interactions when Main Effects are not Significant, 2019. Disponível em: < <https://www.theanalysisfactor.com/interactions-main-effects-not-significant/>>. Acesso em: 11 fev. 2019.

GERAGHTY, J.; HEAVEY, C. A comparison of hybrid push/pull and CONWIP/pull production inventory control policies. **International Journal of Production Economics**, v. 91, n. 1, p. 75–90, 2004.

GERAGHTY, J.; HEAVEY, C. A review and comparison of hybrid and pull-type production control strategies. **OR Spectrum**, v. 27, p. 435–457, 2005.

GERWIN, D. An Agenda For Research on the Flexibility of Manufacturing Processes. **International Journal of Operations & Production Management**, v. 25, n. 12, p. 1171–1182, 1987.

GERWIN, D. Manufacturing Flexibility: A Strategic Perspective. **Management Science**, v. 39, n. 4, p. 395–410, 1993.

GIL, A. **Métodos e Técnicas de Pesquisa Social**. 2. ed. São Paulo: Editora Atlas, 1989.

GREENWELL, R. N.; ANGUS, J. E.; FINCK, M. Optimal Mutation Probability for Genetic Algorithms. **Mathematical and Computer Modelling**, v. 21, n. 8, 1995.

GUIDE JR, V. D. R.; KETOKIVI, M. Notes from the Editors: Redefining some methodological criteria for the journal. **Journal of Operations Management**, 2015.

GUO, H.; TAO, F.; ZHANG, L.; LAILI, Y. J.; LIU, D. K. Research on measurement method of resource service composition flexibility in service-oriented manufacturing system. **International Journal of Computer Integrated Manufacturing**, v. 25, n. 2, p. 113–135, 2012.

GUPTA, Y. P.; GOYAL, S. Flexibility of manufacturing systems: Concepts and measurements. **European Journal of Operational Research**, v. 43, n. 2, p. 119–135, 1989.

HOFMANN, E., RÜSCH, M. Industry 4.0 and the current status as well as future prospects on logistics. **Computers in Industry**, v. 89, p. 23 – 34, 2017.

HOPP, W. J.; SPEARMAN, M. L.; **A Ciência da Fábrica**. São Paulo: bookman, 2013.

IDRIS, F., RAHMAN, N., HASSAN, M. Validating dimensions of operations flexibility in Malaysian service firms: a confirmatory factor analytics approach. **International Journal of Services and Operations Management**, vol. 14, 2013.

KHOJASTEH, Y.; SATO, R. Selection of a pull production control system in multi-stage production processes. **International Journal of Production Research**, v. 53, n. 14, p. 4363–4379, 2015.

KIM, M.; SURESH, N. C.; KOCABASOGLU-HILLMER, C. An impact of manufacturing flexibility and technological dimensions of manufacturing strategy on improving supply chain responsiveness: Business environment perspective. **International Journal of Production Research**, v. 51, n. 18, p. 5597–5611, 2013.

KITCHENHAM, B.; PEARL BRERETON, O.; BUDGEN, D.; et al. Systematic literature reviews in software engineering - A systematic literature review. **Information and Software Technology**, v. 51, n. 1, p. 7–15, 2009.

KLASSEN, R. D.; MENOR, L. J. The process management triangle: An empirical investigation of process trade-offs. **Journal of Operations Management**, v. 25, n. 5, p. 1015–1034, 2007.

KLEIJNEN, J. P. C. An overview of the design and analysis of simulation experiments for sensitivity analysis. **European Journal of Operational Research**, v. 164, n. 2, p. 287–300, 2005.

KOSTE, L.; MALHOTRA, M. A theoretical framework for analyzing the dimensions of manufacturing flexibility. **Journal of operations management**, v. 18, p. 75–93, 1999.

KRISHNAMURTHY, A.; SURI, R.; VERNON, M. Re-Examining the Performance of MRP and Kanban Material Control Strategies for Multi-Product Flexible Manufacturing Systems. **International Journal of Flexible Manufacturing Systems**, v. 16, p. 123–150, 2004.

KUMAR, S.; SHARMA, R. K. An ISM based framework for structural relationship among various manufacturing flexibility dimensions. **International Journal of Systems Assurance Engineering and Management**, v. 6, n. 4, p. 511–521, 2015.

LASI, H.; FETTKE, P.; KEMPER, H. G.; FELD, T.; HOFFMANN, M. Industry 4.0. **Business and Information Systems Engineering**, v. 6, n. 4, p. 239–242, 2014.

LAW, A. **Simulation Modeling and Analysis**. 5ª edição. Estados Unidos: McGraw, 2014

LEE, H.; SEO, D. W. Performance evaluation of WIP-controlled line production systems with constant processing times. **Computers and Industrial Engineering**, v. 94, p. 138–146, 2016.

LEE, J.; BAGHERI, B.; KAO, H. A Cyber-Physical Systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems. **Manufacturing Letters**, p. 18 – 23, 2014.

LEE, J.; KAO, H. A.; YANG, S. Service innovation and smart analytics for Industry 4.0 and big data environment. **Procedia CIRP**, v. 16, p. 3–8, 2014.

LIAO, X.; DESCHAMPS, F.; LOURES, E. F. R.; RAMOS, L. F. P. Past, present and future of Industry 4.0 - a systematic literature review and research agenda proposal. **International Journal of Production Research**, v. 55, n.12, p. 3609 – 3629, 2017.

LIN, R., SIR, M. Y., PASUPATHY, K. S. Multi-objective simulation optimization using data envelopment analysis and genetic algorithm: Specific application to determining optimal resource levels in surgical services. **Omega**, v. 41, n. 5, p. 881-892, 2013.

LIU, Y.; XU, X. Industry 4.0 and Cloud Manufacturing: A Comparative Analysis. **Journal of Manufacturing Science and Engineering**, v. 139, p. 1 – 7, 2017.

LYNCH, B. J. Optimizing with Genetic Algorithms. **Notas de aula**, 2006. Disponível em: <<https://www.msi.umn.edu/sites/default/files/OptimizingWithGA.pdf>>. Acesso em: 11 fev. 2019.

LU, Y. Industry 4.0: A Survey on Technologies, Applications and Open Research Issues. **Journal of Industrial Information Integration**, p. 1 – 40, 2017.

MARTINEZ, C.; ARANDA, D.; GUTIÉRREZ, L. IT integration, operations flexibility and performance: An empirical study. **Journal of Industrial Engineering and Management**, p. 684 – 707, 2016.

MACDONALD, C.; GUNN, E. A. A framework for analysis of production authorization card-controlled production systems. **Production and Operations Management**, v. 20, n. 6, p. 937–948, 2011.

MCCALL, J. Genetic algorithms for modelling and optimization. **Journal of Computational and Applied Mathematics**, v. 184, n. 1, p. 205-222, 2005.

MCCARTHY, I. Manufacturing classification: Lessons from organizational systematics and biological taxonomy. **Integrated Manufacturing Systems**, v. 6, n. 6, p. 37 – 48, 1995.

MIGUEL, P.; FLEURY, A.; MELLO, C.; NAKANO, D.; LIMA, E.; TURRIONI, J., HO, L.; MORABITO, R.; MARTINS, R.; SOUSA, R.; COSTA, S.; PUREZA, V. **Metodologia de Pesquisa em Engenharia de Produção e Gestão de Operações**. 2. ed. Brasil: Elsevier Editora Ltda, 2012.

MIRANDA, R. C.; MONTEVECHI, J. A. B.; SILVA, A. F.; MARINS, F. A. S. Increasing the efficiency in integer simulation optimization: Reducing the search space through data envelopment analysis and orthogonal arrays. **European Journal of Operational Research**, v. 262, n. 2, p. 673-681, 2017

MISHRA, R.; PUNDIR, A. K.; GANAPATHY, L. Evaluation and prioritisation of manufacturing flexibility alternatives using integrated AHP and TOPSIS method: Evidence from a fashion apparel firm. **Benchmarking**, v. 24, n. 5, 2017.

MOHER, D.; LIBERATI, A.; TETZLAFF, J.; ALTMAN, D. **PRISMA 2009 Flow Diagram**. 2009. Disponível em: < <https://bit.ly/2HshFvO> >. Acesso em: 30 nov. 2017.

MONTGOMERY, D. C., **Design and Analysis of Experiments**. 5ª edição. Estados Unidos: John Wiley & Sons, inc., 2001.

ONYEOCHA, C. E.; GERAGHTY, J. A modification of the hybrid Kanban CONWIP production control strategy for multi-product manufacturing systems. **International manufacturing conference proceedings**, 2012.

ONYEOCHA, C. E.; KHOURY, J.; GERAGHTY, J. Evaluation of multi-product lean manufacturing systems with setup and erratic demand. **Computers and Industrial Engineering**, v. 87, p. 465–480, 2015.

ONYEOCHA, C. E.; WANG, J.; KHOURY, J.; GERAGHTY, J. A comparison of HK-CONWIP and BK-CONWIP control strategies in a multi-product manufacturing system. **Operations Research Perspectives**, v. 2, p. 137-149, 2015.

ONYEOCHA, C. E. Effect of product mix on multi-product pull control. **Simulation Modelling Practice and Theory**, v. 56, p. 16–35, 2015.

PÉREZ, M. P.; BEDIA, A. M. S.; FERNÁNZDEZ, M. C. A review of manufacturing flexibility: Systematising the concept. **International Journal of Production Research**, v. 54, n. 10, p. 3133–3148, 2016.

PIPLANI, R.; ANG, A. W. H. Performance comparison of multiple product kanban control systems. **International Journal of Production Research**, v. 56, n. 3, p. 1299-1312, 2017.

PURWANTO, U.; RAIHAN. The effects of manufacturing flexibility on operational performance; Acknowledging the role if innovation capability. **International Journal of Applied Engineering Research**, p. 38484 – 38490, 2015.

RADZIWON, A.; BILBERG, A.; BOGERS, M.; MADSEN, E. S. The smart factory: Exploring adaptive and flexible manufacturing solutions. **Procedia Engineering**, v. 69, p. 1184–1190, 2014.

ROEVA, O.; FIDANOVA, S.; PAPRZYCKI, M. Influence of The Population Size on Genetic Algorithm Performance in Case of Cultivation Process Modelling. **Proceedings of the 2013 Federated Conference on Computer Science and Information Systems**, p. 371-376, 2013.

ROGERS, P. P.; OJHA, D.; WHITE, R. E. Conceptualising complementarities in manufacturing flexibility: A comprehensive view. **International Journal of Production Research**, v. 49, n. 12, p. 3767–3793, 2011.

ROSEN, S. L., HARMONOSKY, C. M., TRABAND, M. T. A simulation optimization method that considers uncertainty and multiple performance measures. **European Journal of Operational Research**, v. 181, n. 1, p. 315-330, 2007

ROY, R. **Design of Experiments Using the TAGUCHI Approach**. Estados Unidos: John Wiley & Sons, Inc., 2001

SCALABRE, O. **Embracing Industry 4.0—and Rediscovering Growth**, 2019. Disponível em: < <https://www.bcg.com/en-br/capabilities/operations/embracing-industry-4.0-rediscovering-growth.aspx> >. Acesso em: 11 fev. 2019.

SCHERRER-RATHJE, M.; DEFLOIRIN, P.; ANAND, G. Manufacturing flexibility through outsourcing: effects of contingencies. **International Journal of Operations & Production Management**, v. 34, n. 9, p. 1210–1242, 2014.

SCHWAB, K. **A Quarta Revolução Industrial**. 1. ed. São Paulo: EDIPRO, 2016.

SEEBACHER, G.; WINKLER, H. A citation analysis of the research on manufacturing and supply chain flexibility. **International Journal of Production Research**, v. 51, n. 11, p. 3415–3427, 2013.

SETHI, A. K.; SETHI, S. P. Flexibility in manufacturing: A survey. **International Journal of Flexible Manufacturing Systems**, v. 2, n. 4, p. 289–328, 1990.

SIEMENS, **On the Way to Industrie 4.0 – The Digital Enterprise**. 2015. Disponível em: < <https://sie.ag/2wA21sr> >. Acesso em: 17 set. 2017.

SILVA, E.; MENEZES, E. **Metodologia da Pesquisa e Elaboração de Dissertação**. 4. ed. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2005.

SINGH, D.; SINGH OBEROI, J.; SINGH AHUJA, I. An empirical investigation of dynamic capabilities in managing strategic flexibility in manufacturing organizations. **Management Decision**, v. 51, n. 7, p. 1442–1461, 2013.

SINGHOLI, A.; ALI, M.; SHARMA, C. Evaluating the effect of machine and routing flexibility on flexible manufacturing system performance. **International Journal of Services and Operations Management**, v. 16, n. 2, p. 240, 2013.

SLACK, N. Flexibility as a Manufacturing Objective. **International Journal of Operations & Production Management**, v. 3, p. 4–13, 1983.

SLACK, N. The Flexibility of Manufacturing Systems. **International Journal of Operations & Production Management**, v. 7, n. 4, p. 35–45, 1987.

SLACK, N., CHAMBERS, S., JOHNSTON, R. **Administração da Produção**. 4ª edição. Brasil: Editora Atlas S.A., 2015.

SMALLEY, A. **Creating Level Pull**. Estados Unidos: Lean Enterprise Institute, 2004.

SON, Y. K.; PARK, C. S. Economic Measure of Productivity , Quality and Flexibility in Advanced Manufacturing Systems. **Journal of Manufacturing Systems**, p. 193–207, 1987.

SPEARMAN, M. L.; ZAZANIS, M. A. Push and Pull Production Systems: Issues and Comparisons. **Operations Research**, v. 40, n. 3, p. 521–532, 1992.

SUAREZ, F. F.; CUSUMANO, M. A.; FINE, C. H. An Empirical Study of Manufacturing Flexibility in Printed Circuit Board Assembly. **Operations Research**, 1996.

TEICH, E.; CLAUS, T. Measurement of Load and Capacity Flexibility in Manufacturing.

Global Journal of Flexible Systems Management, v. 18, n. 4, p. 291–302, 2017.

THÜRER, M.; STEVENSON, M.; PROTZMAN, C. W. Card-based production control: a review of the control mechanisms underpinning Kanban, ConWIP, POLCA and COBACABANA systems. **Production Planning and Control**, v. 27, n. 14, p. 1143–1157, 2016.

UPTON, D. M. The management of manufacturing flexibility. **California Management Review**, v. 36/2, p. 72–89, 1994.

WANG, L.; TÖRNGREN, M.; ONORI, M. Current status and advancement of cyber-physical systems in manufacturing. **Journal of Manufacturing Systems**. p.517 – 527. 2015.

WANG, S.; WAN, J.; LI, D.; ZHANG, C. Implementing Smart Factory of Industrie 4.0: An Outlook. **International Journal of Distributed Sensor Networks**, v. 2016, 2016.

WÄNSTRÖM, C. Manufacturing and supply chain flexibility – towards a tool to analyse production network coordination at operational level. **Strategic Outsourcing: An International Journal**, v. 7, n. 2, p. 173–194, 2014.

WECK, O. A basic introduction to genetic algorithms: Lecture 11. **Notas de aula**, 2010. Disponível em: <https://ocw.mit.edu/courses/institute-for-data-systems-and-society/ids-338j-multidisciplinary-system-design-optimization-spring-2010/lecture-notes/MITESD_77S10_lec11.pdf>. Acesso em: 11 fev. 2019.

WELCH, P. D. On the problem of the initial transient in steady-state simulation. **IBM Watson Research Center**, 1981.

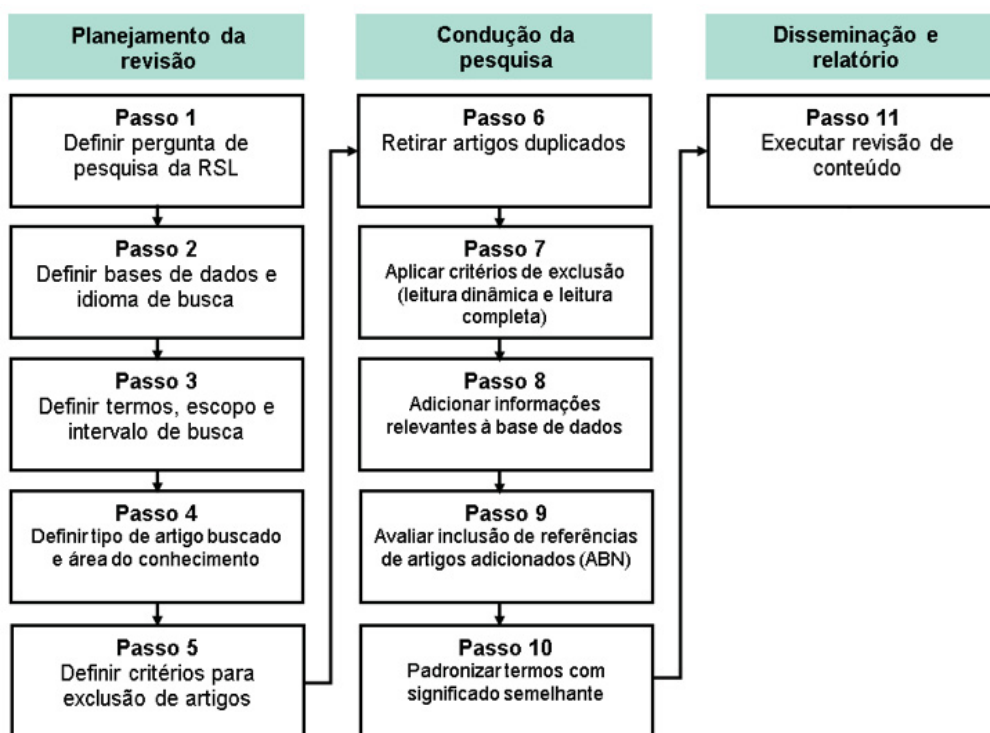
WHITE, W. W. Comments on a paper by Bowman. **Operations Research**. vol. 9, p. 274 – 276, 1961.

APÊNDICE 1 – PROTOCOLO REVISÃO SISTEMÁTICA

A RSL utilizada para a classificação da flexibilidade na seção 2.1 consiste em uma metodologia em que todos os passos adotados pelos pesquisadores no planejamento e execução de uma revisão bibliográfica são apresentados de forma explícita. Sua utilização não só contribui para uma maior robustez nos resultados obtidos, como também possibilita a reprodução, auditoria e atualização da pesquisa por outros membros da comunidade científica.

Existem diversos protocolos para realização de uma RSL. Os trabalhos de Kitchenhamet et al. (2009), Liao et al. (2017) e o manual de boas práticas para realização de RSL e meta-análises, PRISMA (MOHER et al., 2009), são a referência para a construção do presente protocolo, que pode ser observado na FIGURA 35.

FIGURA 35 – PROTOCOLO DA RSL



FONTE: O autor (2019).

A RSL é dividida em três grandes partes, como proposto por Kitchenhamet et al. (2009). Primeiramente há o planejamento da revisão, onde são definidos quais parâmetros devem ser utilizados para buscar os artigos nas bases de dados disponíveis. A escolha de parâmetros deve partir da formulação da pergunta de pesquisa da RSL (passo 1), que representa o objetivo final de todo o processo de

revisão. Os parâmetros consistem inicialmente na definição das bases de dados e dos idiomas empregados na pesquisa (passo 2).

Tendo em vista os idiomas escolhidos e as limitações de opção de busca das bases de dados, são determinados quais termos devem ser utilizados na busca, bem como se há necessidade de operadores de união (representados pela palavra “ou”), operadores de intersecção (representados pela palavra “e”), ou outros semelhantes, para melhorar a precisão da busca (passo 3). Ainda no passo 3, o escopo representa a abrangência do texto dos artigos que serão analisados pelo motor de busca. De forma geral, os termos de pesquisa são procurados no título, resumo e palavras-chave. O intervalo de busca indica o período de tempo em que a pesquisa deve ser realizada, tendo em vista as datas de publicação dos trabalhos procurados.

No passo 4 é necessário definir qual tipo de documento científico se deseja analisar (e. g. artigos de conferência, capítulos de livros, artigos de revista). Finalmente, a última etapa do planejamento da revisão (passo 5) consiste na explicitação de todos os critérios que podem levar à exclusão de algum documento durante a etapa de leitura dinâmica ou leitura completa dos artigos, que ocorre antes das análises de conteúdo.

A etapa de condução de pesquisa se inicia com a retirada de artigos duplicados, no caso de os pesquisadores optarem pela utilização de múltiplas bases de dados (passo 6). O passo 7 consiste na avaliação de elegibilidade dos documentos coletados. A etapa se inicia com uma leitura dinâmica para aplicação dos critérios de exclusão definidos no passo 5. Em seguida, os trabalhos restantes são lidos por completo e novamente avaliados a partir dos critérios de exclusão.

Os documentos que passaram pela triagem têm então todas as informações relevantes adicionadas a uma base de dados (passo 8) que é utilizada para a etapa de revisão de conteúdo. A definição de quais informações são relevantes depende da pergunta de pesquisa escolhida para a RSL.

Nesse momento, é interessante buscar outros documentos relevantes nas referências dos trabalhos que já estão inclusos. Essa etapa é conhecida como Amostragem Bola de Neve. É importante que a regra utilizada para incluir documentos encontrados nas referências seja explícita, para que a RSL mantenha seu caráter objetivo e reproduzível (passo 9). Por fim, termos semelhantes que estão escritos de formas diferentes na base de dados de análise (e. g. utilização de siglas, emprego do

singular ou plural) devem ser padronizados (passo 10) antes do início da revisão de conteúdo.

A etapa de revisão de conteúdo busca responder às perguntas de pesquisa da RSL através de uma análise dos artigos coletados (passo 11).

Os parâmetros de busca utilizados para a RSL estão descritos no QUADRO 32 e são explicados logo em seguida.

QUADRO 32 – PARÂMETROS DE BUSCA

| Parâmetro | Descrição |
|------------------------------|---|
| Pergunta de pesquisa da RSL: | "Quais são os tipos de flexibilidade na manufatura e suas classificações?" |
| Bases de dados: | SCOPUS |
| Idioma de busca: | Inglês |
| Termos de busca: | (TITLE ("flexibility" AND ("operations" OR "manufacturing"))) AND (TITLE-ABS-KEY (((classification W/2 flexibility) OR (taxonomy W/2 flexibility) OR ({dimensions} W/2 flexibility) OR ({types} W/2 flexibility)))) |
| Escopo da busca: | Título e resumo e palavras-chave |
| Intervalo de busca: | 2010-2017* |
| Tipos de trabalho: | Artigos de revistas científicas |
| Área: | Engenharia e Administração |

* data de realização da busca: out/2017

FONTE: O autor (2019).

As perguntas de pesquisa selecionadas buscam alcançar o primeiro objetivo específico do presente trabalho. A base de dados escolhida para a revisão foi a base SCOPUS, devido à ampla gama de operadores lógicos disponíveis para auxílio na execução da busca. Além disso, Liao et al. (2017), após realização de RSL acerca do tema da quarta revolução industrial, concluíram que 90,2% dos documentos incluídos na etapa de revisão de conteúdo podiam ser encontrados apenas com a utilização da base SCOPUS. O idioma escolhido foi apenas o inglês.

Os termos de busca foram divididos em dois grupos de parâmetros, interligados pelo operador de intersecção *AND*, o qual exige que um documento seja considerado apenas quando as condições determinadas por ambos os grupos sejam satisfeitas. Em primeiro lugar, apenas artigos que contenham as palavras *flexibility* e uma das duas palavras intercambiáveis: *operations* ou *manufacturing* no título foram considerados. Essa parametrização visa a garantir que somente documentos que tenham foco principal dentro do assunto buscado apareçam na busca. A estratégia foi utilizada por Pérez, Bedia e Fernández (2016) em uma RSL voltada à flexibilidade na manufatura.

O segundo grupo de parâmetros executa uma busca mais ampla (título, resumo e palavras-chave) e procura identificar documentos que tratem especificamente da classificação de tipos da flexibilidade na manufatura (pergunta de pesquisa da RSL). Para isso, foram identificadas quatro expressões distintas que são utilizadas em trabalhos científicos para classificar os diferentes tipos de flexibilidade:

- a) *{types} W/2 flexibility*: o termo *types* foi escolhido com base na conclusão de Pérez, Bedia e Fernández (2016) de que 97,2% dos trabalhos conceituais e 89,7% dos trabalhos de aplicação no âmbito da flexibilidade utilizam o termo *types* para se referir a formas de flexibilidade, sendo a utilização mais frequente. A utilização do operador lógico de chaves {} em volta do termo impede que a base de dados SCOPUS considere a concordância singular *type* como termo válido de busca (procedimento padrão do sistema mesmo que o operador de aspas fosse utilizado). A aparição do termo singular *type* descaracteriza o objetivo da pesquisa e contribui para a geração de ruído nos resultados, conforme averiguado em rodada de teste. A utilização do operador lógico *W/2* (*within two*) garante que sejam gerados resultados apenas quando o termo *types* esteja a no máximo duas palavras de distância do termo *flexibility*, independente da ordem das palavras. Essa estratégia é necessária, pois expressões como “*types of manufacturing flexibility*” e “*flexibility types*” foram identificadas durante a rodada de teste. Os termos nem sempre estão em imediata sequência ou na mesma ordem;
- b) *{dimensions} W/2 flexibility*: A escolha de *dimensions* também ocorreu com base em Pérez, Bedia e Fernández (2016), que identificaram o termo *dimensions* como o segundo mais frequente (69,4% dos trabalhos conceituais e 37,9% dos trabalhos de aplicação sobre flexibilidade). A utilização dos operadores de chaves e do *W/2* tem a mesma função descrita no item a);
- c) *Classification W/2 flexibility*: o termo *classification* foi identificado em uma rodada de teste, onde foram buscados artigos com os termos *types*, *dimensions* e *flexibility* apenas no título. Mais uma vez foi utilizado o operador lógico *W/2*;
- d) *Taxonomy W/2 flexibility*: o termo *taxonomy* também foi identificado em uma rodada teste onde foram buscados artigos com os termos *types*, *dimensions* e *flexibility* apenas no título. O operador lógico *W/2* foi utilizado.

As expressões foram interligadas pelo operador de união *OR*, que permite que um documento seja considerado quando pelo menos uma das condições se encontre satisfeita.

Foram considerados artigos apenas entre os anos de 2010 e 2017, pois nesse intervalo que se estabelece o movimento da quarta revolução industrial, que é o principal contexto estudado neste trabalho. Contudo, o método da amostragem bola de neve foi utilizado para que todas as referências clássicas utilizadas pelos artigos coletados também sejam inclusas na etapa de revisão de conteúdo.

Quanto ao tipo, somente artigos de revistas científicas foram considerados (inclusive revisões de literatura), tendo se optado pela exclusão de artigos de congresso ou capítulos de livros. Para a delimitação da pesquisa dentro da esfera da Engenharia de Produção, apenas as áreas de Engenharia e Administração foram consideradas.

Os critérios de exclusão adotados durante a leitura dinâmica e leitura completa dos artigos foram determinados com base em Liao et al. (2017) e estão descritos no QUADRO 33.

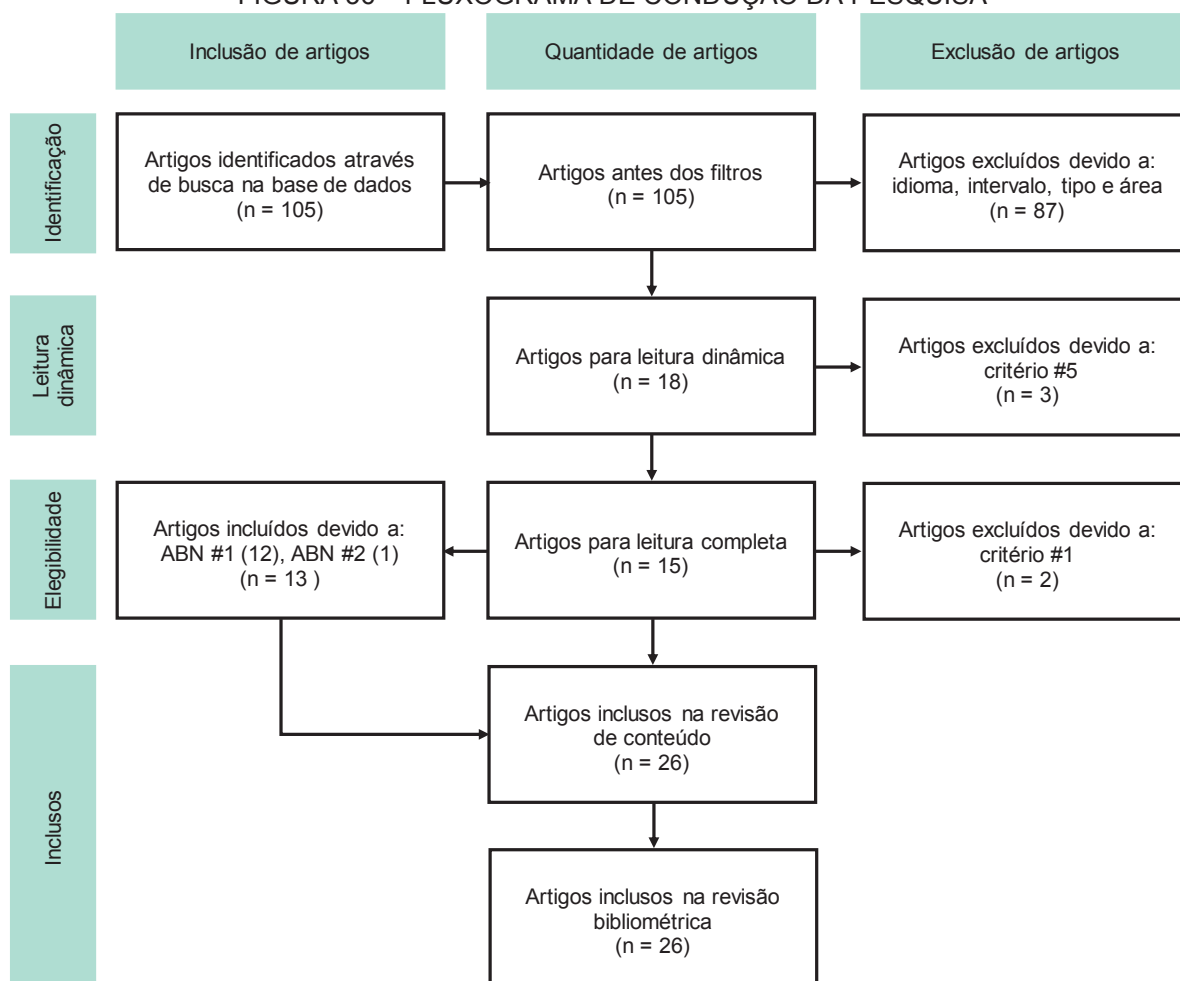
QUADRO 33 – CRITÉRIOS DE EXCLUSÃO

| Critério | Explicação |
|---------------------------|---|
| #1 Inacessibilidade | Não foi possível obter o texto do artigo para leitura. |
| #2 Idioma | Apenas título, resumo e palavras-chave no idioma buscado. |
| #3 Tipo | Documento não é um artigo de revista científica. |
| #4 Tópico não abordado | Não há menção a dimensões da flexibilidade, apesar da aparição dos termos de busca. |
| #5 Fora do escopo | Dimensões da flexibilidade são abordadas, porém fora do escopo da manufatura. |
| #6 Contexto específico | Dimensões da flexibilidade na manufatura são abordadas, porém com foco em algum contexto específico de pesquisa (falta de generalização). |
| #7 Dimensões não listadas | Somente é colocado que existem diversas dimensões da flexibilidade na manufatura, mas elas não são listadas. |

FONTE: O autor (2019).

A síntese da condução da pesquisa está apresentada na FIGURA 36, através de uma adaptação do fluxograma PRISMA (MOHER et al., 2009) de relatório de uma RSL. Do lado esquerdo estão identificadas as fontes de documentos (SCOPUS e amostragem bola de neve) e do lado direito estão indicadas as exclusões realizadas.

FIGURA 36 – FLUXOGRAMA DE CONDUÇÃO DA PESQUISA



FONTE: Adaptado de Moher et al. (2009).

Durante a leitura dinâmica – executada através da leitura dos resumos – foi possível excluir 3 artigos que não se enquadravam dentro do escopo da RSL. O trabalho de Bai e Sarkis (2017) tratava especificamente da flexibilidade no contexto da sustentabilidade ambiental. Já o trabalho de Singh, Oberoi e Ahuja (2013) focava no conceito de flexibilidade estratégica. Por fim, Guo et al. (2012) estudava a flexibilidade para o problema de *resource service composition*. Já na etapa de leitura dos artigos, observou-se que os trabalhos de Martínez, Aranda e Gutiérrez (2016) e Purwanto e Raihan (2015) não possuíam seus textos completos disponíveis.

A primeira rodada de amostragem bola de neve identificou 12 referências clássicas que foram adicionadas ao conjunto de artigos incluídos. Além disso, uma segunda rodada foi realizada com os novos trabalhos, resultando em mais uma adição. Após todo esse processo, 26 artigos foram selecionados para as revisões de conteúdo e bibliometria. A relação dos artigos selecionados, suas origens (*i.e.* busca original, primeira ou segunda amostragem bola de neve), além das principais

informações a respeito das publicações e das revistas estão apresentadas no QUADRO 34.

QUADRO 34 – ARTIGOS SELECIONADOS

| Autor | Países | Revista | H index | Citações | Origem |
|-----------------------------------|------------------------------|---|---------|----------|--------|
| Slack (1983) | Reino Unido | International Journal of Operations & Production Management | 104 | 553 | ABN #1 |
| Browne et al. (1984) | Irlanda, França, Canadá, EUA | The FMS magazine | - | 1039 | ABN #1 |
| Gerwin (1987) | EUA | International Journal of Operations & Production Management | 104 | 568 | ABN #1 |
| Son e Park (1987) | EUA | Journal of Manufacturing Systems | 44 | 234 | ABN #2 |
| Slack (1987) | Reino Unido | International Journal of Operations & Production Management | 104 | 565 | ABN #1 |
| Gupta e Goyal (1989) | EUA, Canada | European Journal of Operational Research | 200 | 579 | ABN #1 |
| Sethi e Sethi (1990) | França, Canada | The International Journal of Flexible Manufacturing Systems | 36* | 1903 | ABN #1 |
| Chen, Calantone e Chung (1992) | EUA | Omega The International Journal of Management Science | 102 | 164 | ABN #1 |
| Gerwin (1993) | EUA | Management Science | 198 | 1389 | ABN #1 |
| Upton (1994) | EUA | California Management Review | 107 | 1149 | ABN #1 |
| Suarez, Cusumano e Fine (1996) | Chile, EUA | Operations Research | 109 | 352 | ABN #1 |
| Koste e Malhotra (1999) | EUA | Journal of Operations Management | 149 | 634 | ABN #1 |
| Ali e Wadhwa (2010) | Índia | International Journal of Production Research | 101 | 33 | Busca |
| Rogers, Ojha e White (2011) | EUA | International Journal of Production Research | 101 | 23 | ABN #1 |
| Chang (2012) | Taiwan | International Journal of Production Research | 101 | 29 | Busca |
| Idris, Rahman e Hassan (2013) | Malásia | International Journal of Services and Operations Management | 19 | 13 | Busca |
| Seebacher e Winkler (2013) | Áustria | International Journal of Production Research | 101 | 27 | Busca |
| Kim, Suresh e Hillmer (2013) | Coréia, EUA, Reino Unido | International Journal of Production Research | 101 | 23 | Busca |
| Singholi, Ali e Sharma (2013) | Índia | International Journal of Services and Operations Management | 19 | 10 | Busca |
| Rathje, Defflorin e Anand (2014) | Suíça, EUA | International Journal of Operations & Production Management | 104 | 10 | Busca |
| Wanstrom (2014) | Suécia | Strategic Outsourcing | 9 | 12 | Busca |
| Kumar e Sharma (2015) | Índia | International Journal of Systems Assurance Engineering and Management | 13 | 6 | Busca |
| Alavi (2016) | Irã | International Journal of Technological Learning, Innovation and Development | 15 | - | Busca |
| Pérez, Bedia e Fernández (2016) | Espanha | International Journal of Production Research | 101 | 5 | Busca |
| Mishra, Pundir e Ganapathy (2017) | Índia | Benchmarking | 44 | 1 | Busca |
| Teich e Claus (2017) | Alemanha | Global Journal of Flexible Systems Management | 13 | - | Busca |

* Revista teve alteração de nome.

FONTE: O autor (2019).

Para cada um dos 26 artigos selecionados para essa revisão, foi verificado quais tipos de flexibilidade foram identificados pelos autores, bem como de que forma cada tipo foi definido. De acordo com o passo 10 do protocolo da RSL, tipos de flexibilidade que apresentam definição semelhante foram agrupados, apesar da aparição de diferentes nomes. Nesse sentido, foram agrupadas as flexibilidades de “máquina” e “equipamento”; “roteamento” e “re-roteamento”; “material” e “manuseio de material”; “curto prazo” e “operacional”; “médio prazo” e “tática”; “longo prazo” e “estratégica”; “produto” e “novo produto”; “externa”, “mercado” e “demanda”.

Durante a etapa de revisão de conteúdo, após a identificação dos tipos de flexibilidade propostos pelos autores, ainda é necessária a organização desses tipos em classificações coerentes. Para isso, foi utilizada uma metodologia de classificação taxonômica. Uma taxonomia corresponde a uma estrutura para a classificação de entidades com base em suas similaridades. O processo taxonômico identifica atributos de diferentes entidades para desenvolver uma classificação. Um *taxon* (*taxa*

para o plural) é a nomenclatura dada ao grupo de entidades que são unidas por serem suficientemente similares entre si, bem como suficientemente diferentes de entidades colocadas em outros grupos. O mecanismo de classificação segue uma hierarquia de níveis categóricos (ou *rankings* taxonômicos) onde se encontram os *taxa*. No nível mais alto, se encontra um único taxon que agrupa todas as entidades. No nível mais baixo, se encontram os *taxa* que não possuem divisões posteriores. O subsídio técnico para a construção de classificações entre entidades pode ter origem teórica (taxonomia teórica) ou empírica (taxonomia empírica). Diferentes taxonomias são observadas na literatura para classificar as mesmas entidades sob diferentes perspectivas ou aspectos (MCCARTHY, 1995).

A classificação da flexibilidade de um sistema produtivo se torna uma tarefa difícil sem a construção de taxonomias, devido a 2 principais problemas identificados pelo pesquisador durante a etapa de revisão de conteúdo da RSL.

- a) pluralidade de aspectos a serem classificados: nem todos os tipos de flexibilidade dizem respeito ao mesmo aspecto. Classificar o sistema entre “flexibilidade de produto” e “flexibilidade de curto prazo”, por exemplo, não faz sentido, visto que estes 2 tipos correspondem a 2 diferentes aspectos inerentes à flexibilidade. Já a classificação entre os tipos “flexibilidade reativa” e “flexibilidade proativa” é coerente ao classificar o sistema quanto a um único aspecto (abordagem);
- b) relações hierárquicas entre os tipos de flexibilidade identificados: As relações de hierarquia devem ser estabelecidas, pois alguns tipos de flexibilidade constituem meramente um subgrupo de um outro tipo de flexibilidade. Um exemplo seriam os tipos “máquina”, “roteamento” e “interna”. Ambas as flexibilidades de máquina e roteamento são exemplos da ocorrência de flexibilidade interna, uma vez que essa indica quaisquer fontes de flexibilidade que ocorram dentro da fábrica para viabilizar o alcance de flexibilidade externa junto ao mercado.

Nesse sentido, o método de taxonomia teórico foi utilizado para organizar os tipos de flexibilidade encontrados na literatura em diferentes classificações hierárquicas. Flexibilidades em níveis hierárquicos superiores se tornam *taxa* agrupando tipos de flexibilidade em níveis hierárquicos inferiores. A primeira etapa da análise de conteúdo da RSL foi utilizada como subsídio técnico para a identificação de todos os diferentes tipos de flexibilidade, bem como a identificação dos diferentes

aspectos a serem classificados (e.g. abordagem, escopo). Para cada um desses aspectos se construiu uma taxonomia.

O estudo taxonômico tem origem nas ciências biológicas, onde a classificação de entidades tem um viés mais objetivo (e.g. classificação dos animais). No âmbito da manufatura, por outro lado, McCarthy (1995) observa que classificar sistemas produtivos é uma tarefa mais subjetiva e complexa. O autor formulou 5 atributos inerentes a uma classificação apropriada, dos quais 4 foram utilizadas como diretrizes para a formulação das taxonomias desenvolvidas neste trabalho (o 5º atributo não foi utilizado, pois diz respeito à escolha de nomenclatura para os *taxa*. Os nomes dos *taxa* foram definidos a partir dos tipos de flexibilidade). Tais atributos se encontram no QUADRO 35.

QUADRO 35 – DIRETRIZES PARA FORMULAÇÃO DAS TAXONOMIAS

| Atributo | Descrição |
|--------------------------|---|
| 1) Mutual exclusão | Não deve haver possibilidade de uma entidade ser designada a mais de um <i>taxon</i> em um mesmo nível categórico |
| 2) Homogeneidade interna | Uma entidade deve ser mais similar com as outras entidades classificadas sob o mesmo <i>taxon</i> , do que com entidades sob outros <i>taxa</i> |
| 3) Coletiva exaustão | A cada nível categórico da taxonomia, todas as entidades devem pertencer a algum <i>taxon</i> |
| 4) Estabilidade | A re-designação de uma entidade entre os <i>taxa</i> não deve ocorrer devido à realização de testes empíricos com métodos novos ou alternativos |

FONTE: Adaptado de McCarthy (1995).

APÊNDICE 2 – CÓDIGO ALGORITMO DE SIMULAÇÃO

As funções desenvolvidas na linguagem Python 3.6 para a realização dos experimentos de simulação são apresentadas a seguir. É importante lembrar que a transição de um pseudocódigo para uma linguagem de programação específica envolve algumas alterações na estrutura do algoritmo, e.g., inicialização de vetores com índice 0 em vez da inicialização com índice 1. As funções “preencher relatório”, “títulos relatórios” e “inicialização” não estão apresentadas, visto que não abordam aspectos técnicos da simulação de eventos discretos.

```

1.  """
2.  Bibliotecas utilizadas
3.  """
4.  import numpy as np
5.  import pandas as pd
6.  import copy
7.  from collections import OrderedDict
8.  from scipy.stats import t
9.  import random
10.
11.
12. def Processo_Poisson(T, lambd, M):
13.     """
14.     Instantes de chegada processo Poisson:
15.     retorna o horário de chegada, limitado superiormente
16.     por T, de M processos Poisson com uma mesma taxa  $\lambda$ .
17.     """
18.     chegadas = []
19.     for i in range(0,M):
20.         total = 0
21.         while True:
22.             intervalo = np.random.exponential(1/lambd)
23.             if (total + intervalo) < T:
24.                 total = total + intervalo
25.                 chegadas.append((total, i))
26.             else:
27.                 break
28.     chegadas = np.array(chegadas)
29.     chegadas = chegadas[chegadas[:,0].argsort()]
30.     instantes = chegadas[:,0]
31.     produtos = chegadas[:,1]
32.     return instantes, produtos
33.
34.
35. def Agendamento (n, M, relógio, T, instantes_atualizado, produtos_atualizado, status
    _PM, inicio_PM, produto_PM, termino_PM):
36.     """
37.     Algoritmo 4: agendamento: retorna as informações do próximo evento
38.     que irá ocorrer: tipo de evento (evento), produto e estação de trabalho
39.     envolvidos e horário de ocorrência, a partir do horário vigente e das
40.     informações de chegada de pedidos (chegadas e tipo) e informações
41.     internas dos processos: processos em operação (MP=1), horário do
42.     início de operação (início), tipo de produto processado (tipo #2)
43.     e tempos de processamento dos tipos de produto (tempos).
44.     """
45.

```

```

46.     if len(instantes_atualizado)>0:
47.         proxima_chegada = instantes_atualizado[0]
48.     else:
49.         proxima_chegada = T+1
50.
51.     proximo_termino = min(termino_PM)
52.     estacao_proximo_termino = np.where(termino_PM==min(termino_PM))[0][0]
53.
54.     if proxima_chegada>T and proximo_termino>T:
55.         evento = 'fim da simulação'
56.         relógio = T
57.         produto = 0
58.     elif proximo_termino <= proxima_chegada:
59.         evento = 'termino processamento'
60.         produto = copy.copy(int(produto_PM[estacao_proximo_termino]))
61.         relógio = float(copy.copy(proximo_termino))
62.     else:
63.         evento = 'chegada pedido'
64.         produto = copy.copy(int(produtos_atualizado[0]))
65.         relógio = copy.copy(proxima_chegada)
66.         instantes_atualizado = instantes_atualizado[1:]
67.         produtos_atualizado = produtos_atualizado[1:]
68.     return evento, produto, relógio, estacao_proximo_termino, instantes_atualizado,
produtos_atualizado
69.
70.
71. def Liberacao_Produto_2(sequencia, atendidos, n, produto, D, A, I, backorder, relógio,
hist, l, PPCS, kan):
72.     """
73.     verifica disponibilidade de produtos e faz a liberação
74.     ou acrescenta pedidos em backorder, além de transferir
75.     kanbans em caso de liberação de acordo com a política
76.     desejada. Retorna, após a liberação, a fila de demanda
77.     do último processo, fila de kanbans disponíveis para o
78.     último processo, estoque de produtos acabados, fila de
79.     backorders, quantidade de produtos entregues até o
80.     momento e histórico de backorders
81.     """
82.
83.     if I[produto,n-1]==0:
84.         backorder[produto] = backorder[produto] + 1
85.         if relógio >= l:
86.             hist = hist + 1
87.     else:
88.         atendidos = atendidos + 1
89.         if backorder[produto] > 0:
90.             backorder[produto] = backorder[produto] - 1
91.         if PPCS == 'KCS':
92.             D[produto,0] = D[produto,0] - 1
93.             A[produto,n-1] = A[produto,n-1] + 1
94.             sequencia[n-1].append(produto)
95.             I[produto,n-1] = I[produto,n-1] - 1
96.         else:
97.             if kan == 'dedicado':
98.                 D[produto,n] = D[produto,n] - 1
99.                 A[produto,n-1] = A[produto,n-1] + 1
100.                 I[produto,n-1] = I[produto,n-1] - 1
101.             elif kan == 'compartilhado':
102.                 D[produto,n] = D[produto,n] - 1
103.                 A[0,n-1] = A[0,n-1] + 1
104.                 I[produto,n-1] = I[produto,n-1] - 1
105.         return D, A, I, backorder, hist, atendidos
106.
107.
108. def Saida_Processo_2(produto, estacao, I, PM, status_PM, termino_PM, n):
109.     """

```

```

110.         retira a peça finalizada de algum tipo de produto que
111.         acaba de ser processado e coloca no estoque de peças
112.         acabadas de uma estação de trabalho indicada. Altera
113.         o status da estação de trabalho para ociosa
114.         '''
115.         I[produto, estacao] = I[produto, estacao] + 1
116.         PM[estacao] = PM[estacao] - 1
117.         status_PM[estacao] = 0
118.         termino_PM[estacao] = T + 10000
119.         return I, PM, status_PM, termino_PM, C
120.
121.
122.     def Puxar_Producao_2(estacao, M, n, sequencia, sequencia_PM, PM, D, A, I, PPC
S, kan):
123.         '''
124.         puxar produção: autoriza a puxada de produção em uma estação específica
125.         quando as condições de puxada de uma estratégia PPCS são satisfeitas,
126.         e a partir de uma regra de sequenciamento de produtos e política de
127.         kanban específica.
128.         '''
129.         'sinalizador de que houve puxada de produção na estação'
130.         sinal = 0
131.         i=0
132.         'fazer varredura das demandas na ordem de chegada'
133.         while i < len(sequencia[estacao]):
134.             produto_a = sequencia[estacao][i]
135.             'puxar produção KCS'
136.             if PPCS == 'KCS':
137.                 'regra especial primeira estacao com abastecimento ilimitado'
138.                 if estacao == 0:
139.                     if A[produto_a,estacao] > 0:
140.                         'retirar kanban disponivel do estágio'
141.                         A[produto_a, estacao] = A[produto_a, estacao] - 1
142.                         'enviar peça ao processo de manufatura'
143.                         PM[estacao] = PM[estacao] + 1
144.                         'atualizar +1 fila sequencia processo de manufatura do es
tágio atual'
145.                         sequencia_PM[estacao].append(produto_a)
146.                         'atualizar -1 fila sequencia do estágio atual'
147.                         del sequencia[estacao][i]
148.                         i = i - 1
149.                         sinal = 1
150.                 else:
151.                     'produção autorizada se houver kanbans disponiveis e produtos
em estoque'
152.                     if A[produto_a,estacao] > 0 and I[produto_a, estacao-1]>0:
153.                         'retirar kanban disponivel do estágio'
154.                         A[produto_a, estacao] = A[produto_a, estacao] - 1
155.                         'transferir kanban da peça em estoque ao estágio anterior'
156.                         A[produto_a, estacao - 1] = A[produto_a, estacao - 1] + 1
157.                         'atualizar +1 fila sequencia do estágio anterior'
158.                         sequencia[estacao-1].append(produto_a)
159.                         'retirar peça em estoque para envio ao processo de manufa
tura'
160.                         I[produto_a, estacao - 1] = I[produto_a, estacao - 1] - 1
161.                         'enviar peça ao processo de manufatura'
162.                         PM[estacao] = PM[estacao] + 1
163.                         'atualizar +1 fila sequencia processo de manufatura do es
tágio atual'
164.                         sequencia_PM[estacao].append(produto_a)
165.                         'atualizar -1 fila sequencia do estágio atual'
166.                         del sequencia[estacao][i]
167.                         i = i - 1
168.                         sinal = 1

```



```

169.         else:
170.             if kan=='dedicado':
171.                 'regra especial primeira estacao com abastecimento ilimitado'
172.             if estacao ==0:
173.                 if A[produto_a,estacao] > 0 and D[produto_a,estacao] > 0:
174.                     'retirar kanban disponivel do estágio'
175.                     A[produto_a, estacao] = A[produto_a, estacao] - 1
176.                     'destruir demanda'
177.                     D[produto_a, estacao] = D[produto_a, estacao] - 1
178.                     'enviar peça ao processo de manufatura'
179.                     PM[estacao] = PM[estacao] + 1
180.                     'atualizar +1 fila sequencia processo de manufatura d
o estágio atual'
181.                     sequencia_PM[estacao].append(produto_a)
182.                     'atualizar -1 fila sequencia do estágio atual'
183.                     del sequencia[estacao][i]
184.                     i = i - 1
185.                     sinal = 1
186.                 else:
187.                     'produção autorizada se houver kanbans disponiveis, deman
das e produtos em estoque'
188.                     if A[produto_a,estacao] > 0 and I[produto_a, estacao-
1]>0 and D[produto_a,estacao] > 0:
189.                         'retirar kanban disponivel do estágio'
190.                         A[produto_a, estacao] = A[produto_a, estacao] - 1
191.                         'destruir demanda'
192.                         D[produto_a, estacao] = D[produto_a, estacao] - 1
193.                         'transferir kanban da peça em estoque ao estágio ante
rior'
194.                         A[produto_a, estacao -1] = A[produto_a, estacao -
1] + 1
195.                         'retirar peça em estoque para envio ao processo de ma
nufatura'
196.                         I[produto_a, estacao - 1] = I[produto_a, estacao - 1]
- 1
197.                         'enviar peça ao processo de manufatura'
198.                         PM[estacao] = PM[estacao] + 1
199.                         'atualizar +1 fila sequencia processo de manufatura d
o estágio atual'
200.                         sequencia_PM[estacao].append(produto_a)
201.                         'atualizar -1 fila sequencia do estágio atual'
202.                         del sequencia[estacao][i]
203.                         i = i - 1
204.                         sinal = 1
205.                     elif kan=='compartilhado':
206.                         'regra especial primeira estacao com abastecimento ilimitado'
207.                     if estacao==0:
208.                         if A[0,estacao] > 0 and D[produto_a,estacao] > 0:
209.                             'retirar kanban disponivel do estágio'
210.                             A[0, estacao] = A[0, estacao] - 1
211.                             'destruir demanda'
212.                             D[produto_a, estacao] = D[produto_a, estacao] - 1
213.                             'enviar peça ao processo de manufatura'
214.                             PM[estacao] = PM[estacao] + 1
215.                             'atualizar +1 fila sequencia processo de manufatura d
o estágio atual'
216.                             sequencia_PM[estacao].append(produto_a)
217.                             'atualizar -1 fila sequencia do estágio atual'
218.                             del sequencia[estacao][i]
219.                             i = i - 1
220.                             sinal = 1
221.                     else:

```

```

222.         'produção autorizada se houver kanbans disponiveis, deman
das e produtos em estoque'
223.         if A[0,estacao] > 0 and I[produto_a, estacao-
1]>0 and D[produto_a,estacao] > 0:
224.             'retirar kanban disponivel do estágio'
225.             A[0, estacao] = A[0, estacao] - 1
226.             'destruir demanda'
227.             D[produto_a, estacao] = D[produto_a, estacao] - 1
228.             'transferir kanban da peça em estoque ao estágio ante
rior'
229.             A[0, estacao -1] = A[0, estacao -1] + 1
230.             'retirar peça em estoque para envio ao processo de ma
nufatura'
231.             I[produto_a, estacao - 1] = I[produto_a, estacao - 1]
- 1
232.             'enviar peça ao processo de manufatura'
233.             PM[estacao] = PM[estacao] + 1
234.             'atualizar +1 fila sequencia processo de manufatura d
o estágio atual'
235.             sequencia_PM[estacao].append(produto_a)
236.             'atualizar -1 fila sequencia do estágio atual'
237.             del sequencia[estacao][i]
238.             i = i - 1
239.             sinal = 1
240.             i = i + 1
241.             return D,A,I,C,PM, sequencia, sequencia_PM, sinal
242.
243.
244.     def Entrada_Processo_2(relogio, estacao, sequencia_PM, PM, status_PM, inicio_
PM, produto_PM, tempos_PM, dist_PM, termino_PM):
245.         '''
246.         da entrada de uma peça no processo de manufatura de uma estacao indicada,
com base numa regra
247.         de sequenciamento PCPS. Atualiza as filas de sequencia do PM e PM. Altera
o status do PM,
248.         atualiza o horário de início de processamento do PM da estação, determina
o tempo de
249.         processamento da estação com base na distribuição de probabilidade indica
da e atualiza
250.         o horário de término de processamento da estação
251.         '''
252.
253.         'sinalizador que houve entrada no processo'
254.         sinal_2 = 0
255.
256.         if len(sequencia_PM[estacao]) > 0 and status_PM[estacao]==0:
257.             sinal_2=1
258.             produto = sequencia_PM[estacao][0]
259.             produto_PM[estacao] = produto
260.             del sequencia_PM[estacao][0]
261.             status_PM[estacao]=1
262.             inicio_PM[estacao]=relogio
263.             duracao = tempos_PM[produto,estacao]
264.             termino_PM[estacao] = inicio_PM[estacao] + duracao
265.
266.             return sequencia_PM, status_PM, inicio_PM, termino_PM, produto_PM, sinal_
2
267.
268.
269.     def Simulacao_2(T,l,n,M,lambd, tempos_PM, dist_PM, PPCS, kan, s,k,c):
270.         '''
271.         simulação: executa o modelo de simulação e retorna os indicadores de dese
mpenho
272.         a partir das configurações desejadas para o cenário.
273.         '''
274.

```

```

275.         'gerar instantes de chegadas de clientes'
276.         instantes, produtos = Processo_Poisson(T, lambd, M)
277.         instantes_atualizado = instantes
278.         produtos_atualizado = produtos
279.
280.         'iniciar variáveis'
281.         titulos, relatorio, relógio, backorder, hist, n_chegadas, atendidos, status_PM, inicio_PM, produto_PM, termino_PM, sequencia, sequencia_PM, PM, D, I, A, C = inicializacao(PPCS, kan, n, M, s, k, c, T)
282.         soma_estoque=0
283.
284.         'executar laço entre eventos até o fim da simulação'
285.         while True:
286.             evento, produto, relógio_n, estacao_proximo_termino, instantes_atualizado, produtos_atualizado = Agendamento(n, M, relógio, T, instantes_atualizado, produtos_atualizado, status_PM, inicio_PM, produto_PM, termino_PM)
287.
288.             'atualizar indicador estoque'
289.             if relógio_n >= 1:
290.                 if relógio >= 1:
291.                     tot_estoque=0
292.                     for j in range(0,n):
293.                         tot_estoque = tot_estoque + PM[j][0]
294.                         for i in range(0,M):
295.                             tot_estoque = tot_estoque + I[i,j]
296.                         soma_estoque = soma_estoque + (tot_estoque * (relógio_n - relógio))
297.                 else:
298.                     tot_estoque=0
299.                     for j in range(0,n):
300.                         tot_estoque = tot_estoque + PM[j][0]
301.                         for i in range(0,M):
302.                             tot_estoque = tot_estoque + I[i,j]
303.                         soma_estoque = soma_estoque + (tot_estoque * (relógio_n - 1))
304.
305.             relógio = relógio_n
306.             if evento=='fim da simulação':
307.                 relatorio = Preencher_Relatorio(PPCS, kan, M, n, relatorio, evento, relógio, D,I,A,C, PM, backorder, hist, atendidos, status_PM, inicio_PM, produto_PM, termino_PM)
308.                 break
309.             elif evento=='chegada pedido':
310.                 if relógio >= 1:
311.                     n_chegadas = n_chegadas + 1
312.                     texto_produto = str(produto)
313.                     evento = 'chegada de pedido produto ' + texto_produto
314.                     if PPCS == 'KCS':
315.                         D[produto,0] = D[produto,0] + 1
316.                     else:
317.                         D[produto,:] = D[produto, :] + 1
318.                     for i in range(0,n):
319.                         sequencia[i].append(produto)
320.                     D, A, I, backorder, hist, atendidos = Liberacao_Produto_2(sequencia, atendidos, n, produto, D, A, I, backorder, relógio, hist, 1, PPCS, kan)
321.                     relatorio = Preencher_Relatorio(PPCS, kan, M, n, relatorio, evento, relógio, D,I,A,C, PM, backorder, hist, atendidos, status_PM, inicio_PM, produto_PM, termino_PM)
322.             elif evento=='termino processamento':
323.                 texto_estacao = str(estacao_proximo_termino)
324.                 texto_produto = str(produto)
325.                 evento = 'termino processamento estacao ' + texto_estacao + ' produto ' + texto_produto
326.                 I, PM, status_PM, termino_PM, C = Saida_Processo_2(produto, estacao_proximo_termino, I, PM, status_PM, termino_PM, n)

```

```

327.         relatorio = Preencher_Relatorio(PPCS, kan, M, n, relatorio, event
o, relógio, D,I,A,C, PM, backorder, hist, atendidos, status_PM, inicio_PM, produto_P
M, termino_PM)
328.         if estacao_proximo_termino + 1==n and backorder[produto] > 0:
329.             D, A, I, backorder, hist, atendidos = Liberacao_Produto_2(seq
uencia, atendidos, n, produto, D, A, I, backorder, relógio, hist, l, PPCS, kan)
330.             evento = 'atendimento backorder'
331.             relatorio = Preencher_Relatorio(PPCS, kan, M, n, relatorio, e
vento, relógio, D,I,A,C, PM, backorder, hist, atendidos, status_PM, inicio_PM, produ
to_PM, termino_PM)
332.             'verificar autorização para puxar produção nas estações'
333.             for k in range (0,n):
334.                 'varrer estações do fim ao começo para liberar kanbans para estaç
ões iniciais'
335.                 estacao = n - 1- k
336.                 D,A,I,C,PM, sequencia, sequencia_PM, sinal = Puxar_Producao_2(est
acao, M, n, sequencia, sequencia_PM, PM, D, A, I, PPCS, kan)
337.                 if sinal==1:
338.                     texto_estacao = str(estacao)
339.                     evento='puxar produção na estação ' + texto_estacao
340.                     relatorio = Preencher_Relatorio(PPCS, kan, M, n, relatorio, e
vento, relógio, D,I,A,C, PM, backorder, hist, atendidos, status_PM, inicio_PM, produ
to_PM, termino_PM)
341.                     'verificar entrada em processamento nas estações'
342.                     for k in range (0,n):
343.                         estacao = k
344.                         sequencia_PM, status_PM, inicio_PM, termino_PM, produto_PM, sinal
_2 = Entrada_Processo_2(relógio, estacao, sequencia_PM, PM, status_PM, inicio_PM, pr
oduto_PM, tempos_PM, dist_PM, termino_PM)
345.                         if sinal_2==1:
346.                             texto_estacao = str(estacao)
347.                             texto_produto = str(produto_PM[estacao][0])
348.                             evento = 'entrada de peça em processamento na estação ' + te
xto_estacao + ' produto ' + texto_produto
349.                             relatorio = Preencher_Relatorio(PPCS, kan, M, n, relatorio, e
vento, relógio, D,I,A,C, PM, backorder, hist, atendidos, status_PM, inicio_PM, produ
to_PM, termino_PM)
350.                             relatorio = OrderedDict(zip(titulos,relatorio))
351.                             tabela = pd.DataFrame(relatorio)
352.                             estoque_medio = soma_estoque / (T-1)
353.                             niv_servico = 1-(hist/n_chegadas)
354.                             return relatorio, tabela, estoque_medio, niv_servico

```

APÊNDICE 3 – RELATÓRIO VERIFICAÇÃO E VALIDAÇÃO

QUADRO 36 – RELATÓRIO DE SIMULAÇÃO DO SCK

| evento | relogio | atendidos | nao atendidos | backorder p1 | backorder p2 | I11 | I21 | I12 | I22 | D1 | D2 | K11 | K21 | K12 | K22 | estoque | |
|---|---------|-----------|------------------|-----------------|-----------------|-----|-----|-----|-----|----|----|-----|-----|-----|-----|---------|----|
| chegada de pedido produto 0 | 0,0215 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 10 | 10 | 9 | 10 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 39 |
| puxar produção na estação 1 | 0,0215 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 9 | 10 | 9 | 10 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 39 |
| puxar produção na estação 0 | 0,0215 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 9 | 10 | 9 | 10 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 40 |
| entrada de peça em processamento na estação 0 produto 0.0 | 0,0215 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 9 | 10 | 9 | 10 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 40 |
| entrada de peça em processamento na estação 1 produto 0.0 | 0,0215 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 9 | 10 | 9 | 10 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 40 |
| termino processamento estacao 0 produto 0 | 0,0357 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 10 | 10 | 9 | 10 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 40 |
| termino processamento estacao 1 produto 0 | 0,0357 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 10 | 10 | 10 | 10 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 40 |
| chegada de pedido produto 0 | 0,0523 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 10 | 10 | 9 | 10 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 39 |
| puxar produção na estação 1 | 0,0523 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 9 | 10 | 9 | 10 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 39 |
| puxar produção na estação 0 | 0,0523 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 9 | 10 | 9 | 10 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 40 |
| entrada de peça em processamento na estação 0 produto 0.0 | 0,0523 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 9 | 10 | 9 | 10 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 40 |
| entrada de peça em processamento na estação 1 produto 0.0 | 0,0523 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 9 | 10 | 9 | 10 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 40 |
| chegada de pedido produto 0 | 0,0541 | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 9 | 10 | 8 | 10 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 39 |
| puxar produção na estação 1 | 0,0541 | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 8 | 10 | 8 | 10 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 39 |
| puxar produção na estação 0 | 0,0541 | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 8 | 10 | 8 | 10 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 40 |
| chegada de pedido produto 0 | 0,0585 | 4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 8 | 10 | 7 | 10 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 39 |
| puxar produção na estação 1 | 0,0585 | 4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 7 | 10 | 7 | 10 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 39 |
| puxar produção na estação 0 | 0,0585 | 4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 7 | 10 | 7 | 10 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 40 |
| chegada de pedido produto 1 | 0,0641 | 5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 7 | 10 | 7 | 9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 39 |
| puxar produção na estação 1 | 0,0641 | 5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 7 | 9 | 7 | 9 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 39 |
| puxar produção na estação 0 | 0,0641 | 5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 7 | 9 | 7 | 9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 40 |
| chegada de pedido produto 0 | 0,0663 | 6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 7 | 9 | 6 | 9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 39 |
| puxar produção na estação 1 | 0,0663 | 6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 6 | 9 | 6 | 9 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 39 |
| puxar produção na estação 0 | 0,0663 | 6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 6 | 9 | 6 | 9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 40 |
| termino processamento estacao 0 produto 0 | 0,0666 | 6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 7 | 9 | 6 | 9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 40 |
| entrada de peça em processamento na estação 0 produto 0.0 | 0,0666 | 6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 7 | 9 | 6 | 9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 40 |
| termino processamento estacao 1 produto 0 | 0,0666 | 6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 7 | 9 | 7 | 9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 40 |
| entrada de peça em processamento na estação 1 produto 0.0 | 0,0666 | 6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 7 | 9 | 7 | 9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 40 |
| termino processamento estacao 0 produto 0 | 0,0808 | 6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 8 | 9 | 7 | 9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 40 |
| entrada de peça em processamento na estação 0 produto 0.0 | 0,0808 | 6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 8 | 9 | 7 | 9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 40 |
| termino processamento estacao 1 produto 0 | 0,0808 | 6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 8 | 9 | 8 | 9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 40 |
| entrada de peça em processamento na estação 1 produto 0.0 | 0,0808 | 6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 8 | 9 | 8 | 9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 40 |
| termino processamento estacao 0 produto 0 | 0,0951 | 6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 9 | 9 | 8 | 9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 40 |
| termino processamento estacao 0 produto 0 | 0,0951 | 6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 9 | 9 | 8 | 9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 40 |
| entrada de peça em processamento na estação 0 produto 1.0 | 0,0951 | 6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 9 | 9 | 8 | 9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 40 |
| termino processamento estacao 1 produto 0 | 0,0951 | 6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 9 | 9 | 9 | 9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 40 |
| entrada de peça em processamento na estação 1 produto 1.0 | 0,0951 | 6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 9 | 9 | 9 | 9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 40 |
| termino processamento estacao 0 produto 1 | 0,1108 | 6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 9 | 10 | 9 | 9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 40 |
| entrada de peça em processamento na estação 0 produto 0.0 | 0,1108 | 6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 9 | 10 | 9 | 9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 40 |
| termino processamento estacao 1 produto 1 | 0,1108 | 6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 9 | 10 | 9 | 10 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 40 |
| entrada de peça em processamento na estação 1 produto 0.0 | 0,1108 | 6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 9 | 10 | 9 | 10 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 40 |
| chegada de pedido produto 0 | 0,1251 | 7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 9 | 10 | 8 | 10 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 39 |
| puxar produção na estação 1 | 0,1251 | 7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 8 | 10 | 8 | 10 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 39 |
| puxar produção na estação 0 | 0,1251 | 7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 8 | 10 | 8 | 10 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 40 |
| termino processamento estacao 0 produto 0 | 0,1251 | 7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 9 | 10 | 8 | 10 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 40 |
| entrada de peça em processamento na estação 0 produto 0.0 | 0,1251 | 7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 9 | 10 | 8 | 10 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 40 |
| termino processamento estacao 1 produto 0 | 0,1251 | 7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 9 | 10 | 9 | 10 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 40 |
| entrada de peça em processamento na estação 1 produto 0.0 | 0,1251 | 7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 9 | 10 | 9 | 10 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 40 |
| chegada de pedido produto 1 | 0,1252 | 8 | 0 | 0 | 0 | 0 | 9 | 10 | 9 | 9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 39 |
| puxar produção na estação 1 | 0,1252 | 8 | 0 | 0 | 0 | 0 | 9 | 9 | 9 | 9 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 39 |
| puxar produção na estação 0 | 0,1252 | 8 | 0 | 0 | 0 | 0 | 9 | 9 | 9 | 9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 40 |
| chegada de pedido produto 0 | 0,13 | 9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 9 | 9 | 8 | 9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 39 |
| puxar produção na estação 1 | 0,13 | 9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 8 | 9 | 8 | 9 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 39 |
| puxar produção na estação 0 | 0,13 | 9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 8 | 9 | 8 | 9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 40 |
| termino processamento estacao 0 produto 0 | 0,1393 | 9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 9 | 9 | 8 | 9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 40 |
| entrada de peça em processamento na estação 0 produto 1.0 | 0,1393 | 9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 9 | 9 | 8 | 9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 40 |
| termino processamento estacao 1 produto 0 | 0,1393 | 9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 9 | 9 | 9 | 9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 40 |
| entrada de peça em processamento na estação 1 produto 1.0 | 0,1393 | 9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 9 | 9 | 9 | 9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 40 |
| termino processamento estacao 0 produto 1 | 0,1551 | 9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 9 | 10 | 9 | 9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 40 |
| entrada de peça em processamento na estação 0 produto 0.0 | 0,1551 | 9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 9 | 10 | 9 | 9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 40 |
| termino processamento estacao 1 produto 1 | 0,1551 | 9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 9 | 10 | 9 | 10 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 40 |
| entrada de peça em processamento na estação 1 produto 0.0 | 0,1551 | 9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 9 | 10 | 9 | 10 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 40 |
| chegada de pedido produto 0 | 0,1567 | 10 | 0 | 0 | 0 | 0 | 9 | 10 | 8 | 10 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 39 |
| puxar produção na estação 1 | 0,1567 | 10 | 0 | 0 | 0 | 0 | 8 | 10 | 8 | 10 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 39 |
| puxar produção na estação 0 | 0,1567 | 10 | 0 | 0 | 0 | 0 | 8 | 10 | 8 | 10 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 40 |
| chegada de pedido produto 1 | 0,1666 | 11 | 0 | 0 | 0 | 0 | 8 | 10 | 8 | 9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 39 |
| puxar produção na estação 1 | 0,1666 | 11 | 0 | 0 | 0 | 0 | 8 | 9 | 8 | 9 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 39 |
| puxar produção na estação 0 | 0,1666 | 11 | 0 | 0 | 0 | 0 | 8 | 9 | 8 | 9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 40 |
| fim da simulação | 0,1667 | 11 | 0 | 0 | 0 | 0 | 8 | 9 | 8 | 9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 40 |

Fonte: O autor (2019).

QUADRO 37 – RELATÓRIO DE SIMULAÇÃO DO SCKE-D

| evento | relógio | atendidos | nao atendidos | backorder p1 | backorder p2 | I11 | I21 | I12 | I22 | D1 1 | D2 1 | D12 | D22 | D13 | D23 | estoque |
|---|---------|-----------|------------------|-----------------|-----------------|-----|-----|-----|-----|---------|---------|-----|-----|-----|-----|---------|
| chegada de pedido produto 0 | 0,0197 | 1 | 0 | 0 | 0 | 10 | 10 | 9 | 10 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 39 |
| puxar produção na estação 1 | 0,0197 | 1 | 0 | 0 | 0 | 9 | 10 | 9 | 10 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 39 |
| puxar produção na estação 0 | 0,0197 | 1 | 0 | 0 | 0 | 9 | 10 | 9 | 10 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 40 |
| entrada de peça em processamento na estação 0 produto 0.0 | 0,0197 | 1 | 0 | 0 | 0 | 9 | 10 | 9 | 10 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 40 |
| entrada de peça em processamento na estação 1 produto 0.0 | 0,0197 | 1 | 0 | 0 | 0 | 9 | 10 | 9 | 10 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 40 |
| chegada de pedido produto 1 | 0,0205 | 2 | 0 | 0 | 0 | 9 | 10 | 9 | 9 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 39 |
| puxar produção na estação 1 | 0,0205 | 2 | 0 | 0 | 0 | 9 | 9 | 9 | 9 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 39 |
| puxar produção na estação 0 | 0,0205 | 2 | 0 | 0 | 0 | 9 | 9 | 9 | 9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 40 |
| termino processamento estacao 0 produto 0 | 0,034 | 2 | 0 | 0 | 0 | 10 | 9 | 9 | 9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 40 |
| entrada de peça em processamento na estação 0 produto 1.0 | 0,034 | 2 | 0 | 0 | 0 | 10 | 9 | 9 | 9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 40 |
| termino processamento estacao 1 produto 0 | 0,034 | 2 | 0 | 0 | 0 | 10 | 9 | 10 | 9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 40 |
| entrada de peça em processamento na estação 1 produto 1.0 | 0,034 | 2 | 0 | 0 | 0 | 10 | 9 | 10 | 9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 40 |
| termino processamento estacao 0 produto 1 | 0,0497 | 2 | 0 | 0 | 0 | 10 | 10 | 10 | 9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 40 |
| termino processamento estacao 1 produto 1 | 0,0497 | 2 | 0 | 0 | 0 | 10 | 10 | 10 | 10 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 40 |
| chegada de pedido produto 1 | 0,0539 | 3 | 0 | 0 | 0 | 10 | 10 | 10 | 9 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 39 |
| puxar produção na estação 1 | 0,0539 | 3 | 0 | 0 | 0 | 10 | 10 | 10 | 9 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 39 |
| puxar produção na estação 0 | 0,0539 | 3 | 0 | 0 | 0 | 10 | 9 | 10 | 9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 40 |
| entrada de peça em processamento na estação 0 produto 1.0 | 0,0539 | 3 | 0 | 0 | 0 | 10 | 9 | 10 | 9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 40 |
| entrada de peça em processamento na estação 1 produto 1.0 | 0,0539 | 3 | 0 | 0 | 0 | 10 | 9 | 10 | 9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 40 |
| chegada de pedido produto 1 | 0,0544 | 4 | 0 | 0 | 0 | 10 | 9 | 10 | 8 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 39 |
| puxar produção na estação 1 | 0,0544 | 4 | 0 | 0 | 0 | 10 | 8 | 10 | 8 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 39 |
| puxar produção na estação 0 | 0,0544 | 4 | 0 | 0 | 0 | 10 | 8 | 10 | 8 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 40 |
| chegada de pedido produto 0 | 0,0581 | 5 | 0 | 0 | 0 | 10 | 8 | 9 | 8 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 39 |
| puxar produção na estação 1 | 0,0581 | 5 | 0 | 0 | 0 | 9 | 8 | 9 | 8 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 39 |
| puxar produção na estação 0 | 0,0581 | 5 | 0 | 0 | 0 | 9 | 8 | 9 | 8 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 40 |
| termino processamento estacao 0 produto 1 | 0,0696 | 5 | 0 | 0 | 0 | 9 | 9 | 9 | 8 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 40 |
| entrada de peça em processamento na estação 0 produto 1.0 | 0,0696 | 5 | 0 | 0 | 0 | 9 | 9 | 9 | 8 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 40 |
| termino processamento estacao 1 produto 1 | 0,0696 | 5 | 0 | 0 | 0 | 9 | 9 | 9 | 9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 40 |
| entrada de peça em processamento na estação 1 produto 1.0 | 0,0696 | 5 | 0 | 0 | 0 | 9 | 9 | 9 | 9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 40 |
| chegada de pedido produto 0 | 0,0732 | 6 | 0 | 0 | 0 | 9 | 9 | 8 | 9 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 39 |
| puxar produção na estação 1 | 0,0732 | 6 | 0 | 0 | 0 | 8 | 8 | 8 | 9 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 39 |
| puxar produção na estação 0 | 0,0732 | 6 | 0 | 0 | 0 | 8 | 8 | 8 | 9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 40 |
| chegada de pedido produto 1 | 0,0774 | 7 | 0 | 0 | 0 | 8 | 9 | 8 | 8 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 39 |
| puxar produção na estação 1 | 0,0774 | 7 | 0 | 0 | 0 | 8 | 8 | 8 | 8 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 39 |
| puxar produção na estação 0 | 0,0774 | 7 | 0 | 0 | 0 | 8 | 8 | 8 | 8 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 40 |
| termino processamento estacao 0 produto 1 | 0,0854 | 7 | 0 | 0 | 0 | 8 | 9 | 8 | 8 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 40 |
| entrada de peça em processamento na estação 0 produto 0.0 | 0,0854 | 7 | 0 | 0 | 0 | 8 | 9 | 8 | 8 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 40 |
| termino processamento estacao 1 produto 1 | 0,0854 | 7 | 0 | 0 | 0 | 8 | 8 | 8 | 9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 40 |
| entrada de peça em processamento na estação 1 produto 0.0 | 0,0854 | 7 | 0 | 0 | 0 | 8 | 9 | 8 | 9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 40 |
| chegada de pedido produto 1 | 0,094 | 8 | 0 | 0 | 0 | 8 | 8 | 8 | 8 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 39 |
| puxar produção na estação 1 | 0,094 | 8 | 0 | 0 | 0 | 8 | 8 | 8 | 8 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 39 |
| puxar produção na estação 0 | 0,094 | 8 | 0 | 0 | 0 | 8 | 8 | 8 | 8 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 40 |
| termino processamento estacao 0 produto 0 | 0,0996 | 8 | 0 | 0 | 0 | 9 | 8 | 8 | 8 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 40 |
| entrada de peça em processamento na estação 0 produto 0.0 | 0,0996 | 8 | 0 | 0 | 0 | 9 | 8 | 8 | 8 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 40 |
| termino processamento estacao 1 produto 0 | 0,0996 | 8 | 0 | 0 | 0 | 9 | 8 | 8 | 8 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 40 |
| entrada de peça em processamento na estação 1 produto 0.0 | 0,0996 | 8 | 0 | 0 | 0 | 9 | 8 | 8 | 8 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 40 |
| chegada de pedido produto 1 | 0,1037 | 9 | 0 | 0 | 0 | 9 | 8 | 9 | 7 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 39 |
| puxar produção na estação 1 | 0,1037 | 9 | 0 | 0 | 0 | 9 | 7 | 9 | 7 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 39 |
| puxar produção na estação 0 | 0,1037 | 9 | 0 | 0 | 0 | 9 | 7 | 9 | 7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 40 |
| termino processamento estacao 0 produto 0 | 0,1139 | 9 | 0 | 0 | 0 | 10 | 7 | 9 | 7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 40 |
| entrada de peça em processamento na estação 0 produto 1.0 | 0,1139 | 9 | 0 | 0 | 0 | 10 | 7 | 9 | 7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 40 |
| termino processamento estacao 1 produto 0 | 0,1139 | 9 | 0 | 0 | 0 | 10 | 7 | 10 | 7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 40 |
| entrada de peça em processamento na estação 1 produto 1.0 | 0,1139 | 9 | 0 | 0 | 0 | 10 | 7 | 10 | 7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 40 |
| termino processamento estacao 0 produto 1 | 0,1296 | 9 | 0 | 0 | 0 | 10 | 8 | 10 | 7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 40 |
| entrada de peça em processamento na estação 0 produto 1.0 | 0,1296 | 9 | 0 | 0 | 0 | 10 | 8 | 10 | 7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 40 |
| termino processamento estacao 1 produto 1 | 0,1296 | 9 | 0 | 0 | 0 | 10 | 8 | 10 | 8 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 40 |
| entrada de peça em processamento na estação 1 produto 1.0 | 0,1296 | 9 | 0 | 0 | 0 | 10 | 8 | 10 | 8 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 40 |
| chegada de pedido produto 0 | 0,1419 | 10 | 0 | 0 | 0 | 10 | 8 | 9 | 8 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 39 |
| puxar produção na estação 1 | 0,1419 | 10 | 0 | 0 | 0 | 9 | 8 | 9 | 8 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 39 |
| puxar produção na estação 0 | 0,1419 | 10 | 0 | 0 | 0 | 9 | 8 | 9 | 8 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 40 |
| termino processamento estacao 0 produto 1 | 0,1454 | 10 | 0 | 0 | 0 | 9 | 9 | 9 | 8 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 40 |
| entrada de peça em processamento na estação 0 produto 1.0 | 0,1454 | 10 | 0 | 0 | 0 | 9 | 9 | 9 | 8 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 40 |
| termino processamento estacao 1 produto 1 | 0,1454 | 10 | 0 | 0 | 0 | 9 | 9 | 9 | 9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 40 |
| entrada de peça em processamento na estação 1 produto 1.0 | 0,1454 | 10 | 0 | 0 | 0 | 9 | 9 | 9 | 9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 40 |
| termino processamento estacao 0 produto 1 | 0,1611 | 10 | 0 | 0 | 0 | 9 | 10 | 9 | 9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 40 |
| entrada de peça em processamento na estação 0 produto 0.0 | 0,1611 | 10 | 0 | 0 | 0 | 9 | 10 | 9 | 9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 40 |
| termino processamento estacao 1 produto 1 | 0,1611 | 10 | 0 | 0 | 0 | 9 | 10 | 9 | 10 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 40 |
| entrada de peça em processamento na estação 1 produto 0.0 | 0,1611 | 10 | 0 | 0 | 0 | 9 | 10 | 9 | 10 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 40 |
| fim da simulação | 0,1667 | 10 | 0 | 0 | 0 | 9 | 10 | 9 | 10 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 40 |

Fonte: O autor (2019).

QUADRO 38 – RELATÓRIO DE SIMULAÇÃO DO SCKE-C

| evento | relogio | atendidos | nao atendidos | backorder produto 0 | backorder produto 1 | I11 | I21 | I12 | I22 | D1 1 | D2 1 | D12 | D22 | D13 | D23 | K1 | K2 | estoque | |
|---|---------|-----------|------------------|------------------------|------------------------|-----|-----|-----|-----|---------|---------|-----|-----|-----|-----|----|----|---------|----|
| chegada de pedido produto 1 | 0,0033 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 10 | 10 | 10 | 9 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 10 | 11 | 39 |
| puxar produção na estação 1 | 0,0033 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 10 | 9 | 10 | 9 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 11 | 10 | 39 |
| puxar produção na estação 0 | 0,0033 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 10 | 9 | 10 | 9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 10 | 10 | 40 |
| entrada de peça em processamento na estação 0 produto 1.0 | 0,0033 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 10 | 9 | 10 | 9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 10 | 10 | 40 |
| entrada de peça em processamento na estação 1 produto 1.0 | 0,0033 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 10 | 9 | 10 | 9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 10 | 10 | 40 |
| chegada de pedido produto 0 | 0,0151 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 10 | 9 | 9 | 9 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 10 | 11 | 39 |
| puxar produção na estação 1 | 0,0151 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 9 | 9 | 9 | 9 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 11 | 10 | 39 |
| puxar produção na estação 0 | 0,0151 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 9 | 9 | 9 | 9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 10 | 10 | 40 |
| termino processamento estacao 0 produto 1 | 0,019 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 9 | 10 | 9 | 9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 10 | 10 | 40 |
| entrada de peça em processamento na estação 0 produto 0.0 | 0,019 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 9 | 10 | 9 | 9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 10 | 10 | 40 |
| termino processamento estacao 1 produto 1 | 0,019 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 9 | 10 | 9 | 10 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 10 | 10 | 40 |
| entrada de peça em processamento na estação 1 produto 0.0 | 0,019 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 9 | 10 | 9 | 10 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 10 | 10 | 40 |
| chegada de pedido produto 1 | 0,0296 | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 9 | 10 | 9 | 9 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 10 | 11 | 39 |
| puxar produção na estação 1 | 0,0296 | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 9 | 9 | 9 | 9 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 11 | 10 | 39 |
| puxar produção na estação 0 | 0,0296 | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 9 | 9 | 9 | 9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 10 | 10 | 40 |
| termino processamento estacao 0 produto 0 | 0,0333 | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 10 | 9 | 9 | 9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 10 | 10 | 40 |
| entrada de peça em processamento na estação 0 produto 1.0 | 0,0333 | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 10 | 9 | 9 | 9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 10 | 10 | 40 |
| termino processamento estacao 1 produto 0 | 0,0333 | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 10 | 9 | 10 | 9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 10 | 10 | 40 |
| entrada de peça em processamento na estação 1 produto 1.0 | 0,0333 | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 10 | 9 | 10 | 9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 10 | 10 | 40 |
| termino processamento estacao 0 produto 1 | 0,049 | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 10 | 10 | 10 | 9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 10 | 10 | 40 |
| termino processamento estacao 1 produto 1 | 0,049 | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 10 | 10 | 10 | 10 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 10 | 10 | 40 |
| chegada de pedido produto 1 | 0,0759 | 4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 10 | 10 | 10 | 9 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 10 | 11 | 39 |
| puxar produção na estação 1 | 0,0759 | 4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 10 | 9 | 10 | 9 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 11 | 10 | 39 |
| puxar produção na estação 0 | 0,0759 | 4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 10 | 9 | 10 | 9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 10 | 10 | 40 |
| entrada de peça em processamento na estação 0 produto 1.0 | 0,0759 | 4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 10 | 9 | 10 | 9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 10 | 10 | 40 |
| entrada de peça em processamento na estação 1 produto 1.0 | 0,0759 | 4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 10 | 9 | 10 | 9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 10 | 10 | 40 |
| termino processamento estacao 0 produto 1 | 0,0916 | 4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 10 | 10 | 10 | 9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 10 | 10 | 40 |
| termino processamento estacao 1 produto 1 | 0,0916 | 4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 10 | 10 | 10 | 10 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 10 | 10 | 40 |
| chegada de pedido produto 0 | 0,1035 | 5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 10 | 10 | 9 | 10 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 10 | 11 | 39 |
| puxar produção na estação 1 | 0,1035 | 5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 9 | 10 | 9 | 10 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 11 | 10 | 39 |
| puxar produção na estação 0 | 0,1035 | 5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 9 | 10 | 9 | 10 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 10 | 10 | 40 |
| entrada de peça em processamento na estação 0 produto 0.0 | 0,1035 | 5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 9 | 10 | 9 | 10 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 10 | 10 | 40 |
| entrada de peça em processamento na estação 1 produto 0.0 | 0,1035 | 5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 9 | 10 | 9 | 10 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 10 | 10 | 40 |
| chegada de pedido produto 1 | 0,1159 | 6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 9 | 10 | 9 | 9 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 10 | 11 | 39 |
| puxar produção na estação 1 | 0,1159 | 6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 9 | 9 | 9 | 9 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 11 | 10 | 39 |
| puxar produção na estação 0 | 0,1159 | 6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 9 | 9 | 9 | 9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 10 | 10 | 40 |
| termino processamento estacao 0 produto 0 | 0,1178 | 6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 10 | 9 | 9 | 9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 10 | 10 | 40 |
| entrada de peça em processamento na estação 0 produto 1.0 | 0,1178 | 6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 10 | 9 | 9 | 9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 10 | 10 | 40 |
| termino processamento estacao 1 produto 0 | 0,1178 | 6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 10 | 9 | 10 | 9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 10 | 10 | 40 |
| entrada de peça em processamento na estação 1 produto 1.0 | 0,1178 | 6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 10 | 9 | 10 | 9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 10 | 10 | 40 |
| termino processamento estacao 0 produto 1 | 0,1335 | 6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 10 | 10 | 10 | 9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 10 | 10 | 40 |
| termino processamento estacao 1 produto 1 | 0,1335 | 6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 10 | 10 | 10 | 10 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 10 | 10 | 40 |
| chegada de pedido produto 0 | 0,1503 | 7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 10 | 10 | 9 | 10 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 10 | 11 | 39 |
| puxar produção na estação 1 | 0,1503 | 7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 9 | 10 | 9 | 10 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 11 | 10 | 39 |
| puxar produção na estação 0 | 0,1503 | 7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 9 | 10 | 9 | 10 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 10 | 10 | 40 |
| entrada de peça em processamento na estação 0 produto 0.0 | 0,1503 | 7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 9 | 10 | 9 | 10 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 10 | 10 | 40 |
| entrada de peça em processamento na estação 1 produto 0.0 | 0,1503 | 7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 9 | 10 | 9 | 10 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 10 | 10 | 40 |
| chegada de pedido produto 1 | 0,1642 | 8 | 0 | 0 | 0 | 0 | 9 | 10 | 9 | 9 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 10 | 11 | 39 |
| puxar produção na estação 1 | 0,1642 | 8 | 0 | 0 | 0 | 0 | 9 | 9 | 9 | 9 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 11 | 10 | 39 |
| puxar produção na estação 0 | 0,1642 | 8 | 0 | 0 | 0 | 0 | 9 | 9 | 9 | 9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 10 | 10 | 40 |
| termino processamento estacao 0 produto 0 | 0,1646 | 8 | 0 | 0 | 0 | 0 | 10 | 9 | 9 | 9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 10 | 10 | 40 |
| entrada de peça em processamento na estação 0 produto 1.0 | 0,1646 | 8 | 0 | 0 | 0 | 0 | 10 | 9 | 9 | 9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 10 | 10 | 40 |
| termino processamento estacao 1 produto 0 | 0,1646 | 8 | 0 | 0 | 0 | 0 | 10 | 9 | 10 | 9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 10 | 10 | 40 |
| entrada de peça em processamento na estação 1 produto 1.0 | 0,1646 | 8 | 0 | 0 | 0 | 0 | 10 | 9 | 10 | 9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 10 | 10 | 40 |
| fim da simulação | 0,1667 | 8 | 0 | 0 | 0 | 0 | 10 | 9 | 10 | 9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 10 | 10 | 40 |

Fonte: O autor (2019).

APÊNDICE 4 – CÓDIGO ALGORITMO FILAS M/M/1

Para a simulação de uma fila simplificada do tipo *M/M/1* na seção 3.5, foi utilizado um algoritmo derivado do algoritmo de simulação abordado em detalhes na seção 3.7 e no Apêndice 2. Além do algoritmo principal, modificações simples também foram conduzidas nas funções de suporte.

```

1. def Simulacao_Fila(T,l,M,lambda_a, tempos_PM):
2.     '''
3.     simulação fila: executa o modelo de simulação de uma fila M/M/1.
4.     '''
5.
6.     lambda = lambda_a / M
7.
8.     'gerar instantes de chegadas de clientes'
9.     instantes, produtos = Processo_Poisson(T, lambda, M)
10.    instantes_atualizado = instantes
11.    produtos_atualizado = produtos
12.
13.    'iniciar variáveis'
14.    titulos, relatorio, relógio, n_chegadas, atendidos, status_PM, inicio_PM, produto_PM, termino_PM, sequencia, D = Inicializacao_Fila(M, T)
15.    soma_estoque=0
16.    chegadas_ordem = []
17.    espera = []
18.
19.    'executar laço entre eventos até o fim da simulação'
20.    while True:
21.        evento, produto, relógio_n, instantes_atualizado, produtos_atualizado = Agendamento_Fila(M, relógio, T, instantes_atualizado, produtos_atualizado, status_PM, inicio_PM, produto_PM, termino_PM)
22.
23.        'atualizar indicador estoque'
24.        if relógio_n >= 1:
25.            if relógio_n >= l:
26.                tot_estoque=0
27.                for i in range(0,M):
28.                    tot_estoque = tot_estoque + D[i]
29.                tot_estoque = tot_estoque + status_PM
30.                soma_estoque = soma_estoque + (tot_estoque * (relógio_n - relógio))
31.            else:
32.                tot_estoque=0
33.                for i in range(0,M):
34.                    tot_estoque = tot_estoque + D[i]
35.                tot_estoque = tot_estoque + status_PM
36.                soma_estoque = soma_estoque + (tot_estoque * (relógio_n - l))
37.            relógio = relógio_n
38.
39.            if evento=='fim da simulação':
40.                relatorio = Preencher_Relatorio_Fila(M, relatorio, evento, relógio, D, atendidos, status_PM, inicio_PM, produto_PM, termino_PM)
41.                break
42.            elif evento=='chegada pedido':
43.                chegadas_ordem.append(relógio)
44.                n_chegadas = n_chegadas + 1
45.                texto_produto = str(produto)
46.                evento = 'chegada de pedido produto ' + texto_produto

```



```

47.         D[produto,0] = D[produto,0] + 1
48.         sequencia.append(produto)
49.         relatorio = Preencher_Relatorio_Fila(M, relatorio, evento, relógio, D, a
tendidos, status_PM, inicio_PM, produto_PM, termino_PM)
50.         elif evento=='termino processamento':
51.             texto_produto = str(produto)
52.             evento = 'termino processamento estacao ' + ' produto ' + texto_produ
to
53.             status_PM = 0
54.             if relógio >= 1:
55.                 espera.append(termino_PM - chegadas_ordem[atendidos])
56.                 atendidos = atendidos + 1
57.                 termino_PM = T + 10000
58.                 relatorio = Preencher_Relatorio_Fila(M, relatorio, evento, relógio, D, a
tendidos, status_PM, inicio_PM, produto_PM, termino_PM)
59.
60.         'verificar entrada de processamento'
61.         dem = 0
62.         for i in range(0,M):
63.             dem = dem + D[i,0]
64.
65.         if status_PM==0 and dem > 0:
66.             y = 0
67.             saida=1
68.             while saida > 0:
69.                 produto_prod = sequencia[atendidos + y]
70.                 if D[produto_prod,0] > 0:
71.                     saida=0
72.                 else:
73.                     y = y + 1
74.
75.             status_PM = 1
76.             D[produto_prod,0] = D[produto_prod,0] - 1
77.             inicio_PM = relógio
78.             'Tempo de processamento exponencial por se tratar de fila M/M/1'
79.             duracao = np.random.exponential(tempos_PM[produto_prod])
80.             termino_PM = inicio_PM + duracao
81.             produto_PM = produto_prod
82.             texto_produto = str(produto_prod)
83.             evento = 'entrada de peça em processamento - produto ' + texto_produto
84.
85.             relatorio = Preencher_Relatorio_Fila(M, relatorio, evento, relógio, D, a
tendidos, status_PM, inicio_PM, produto_PM, termino_PM)
86.
87.         relatorio = OrderedDict(zip(titulos,relatorio))
88.         tabela = pd.DataFrame(relatorio)
89.         estoque_medio = soma_estoque / (T-1)
90.         espera_media = np.mean(espera)
91.         return tabela, estoque_medio, espera_media, chegadas_ordem, sequencia, espera

```

APÊNDICE 5 – CÓDIGO ALGORITMO GENÉTICO

O código do algoritmo genético e suas funções suporte são apresentados. No caso da função principal, está apresentado um AG que concebe seis proles por geração e executa *crossover* pelo método uniforme. A função mutação está parametrizada para fazer a mutação de duas proles por vez. Para esta implementação, não foi utilizado *fitness* negativa e transformação em um problema de maximização, visto que o resultado pode ser obtido de maneira mais simples com *fitness* positiva e minimização, sem qualquer prejuízo de conceito ou cálculo. Para isto, basta garantir que:

- 1) O método de seleção por torneio escolha o participante que apresentar o menor valor de *fitness*, de maneira inversa ao apresentado no pseudocódigo da seção 3.8;
- 2) Durante a etapa de seleção natural, as q proles concebidas substituem os q indivíduos que apresentam maior *fitness*.

```

1. def Inicializacao_Geracao(n_crom, parametros):
2.     '''
3.     povoar a geração inicial de um algoritmo
4.     genético com n cromossomos, levando em conta os limites
5.     superiores e inferiores de cada parâmetro e uma política
6.     de geração específica
7.     '''
8.     valores = []
9.     n_parametros = np.size(parametros[0])
10.    for i in range(0,n_crom):
11.        valores.append([])
12.        for j in range (0,n_parametros):
13.            valores[i].append(np.random.randint(parametros[0][j],parametros[1][j]))
14.    return valores
15.
16.
17. def Valores_Parametros(valores, n_crom, M,n, PPCS, kan):
18.     '''
19.     ajusta os parametros s, k e c para simulação, dado um numero de
20.     cromossomos, politica de controle e kanbans e numero de produtos
21.     '''
22.     s = []
23.     k = []
24.     c = []
25.     for i in range (0, n_crom):
26.         s.append([])
27.         s[i] = np.array(valores[i][0:(n*M)])
28.         s[i].shape= (M,n)
29.
30.     if PPCS=='KCS':
31.         for i in range (0, n_crom):
32.             k.append([])
33.             c.append([])
34.             k[i] = 0
35.             c[i] = 0

```

```

36.
37.     elif PPCS=='EKCS':
38.         if kan=='dedicado':
39.             for i in range(0, n_crom):
40.                 k.append([])
41.                 c.append([])
42.                 c[i] = 0
43.                 k[i] = np.array(valores[i][(n*M):((n*M)+(n*M))])
44.                 k[i].shape = (M, n)
45.             else:
46.                 for i in range(0, n_crom):
47.                     k.append([])
48.                     c.append([])
49.                     c[i] = 0
50.                     k[i] = np.array(valores[i][(n*M):((n*M)+n)])
51.                     k[i].shape = (1, n)
52.         else:
53.             if kan=='dedicado':
54.                 for i in range(0, n_crom):
55.                     k.append([])
56.                     c.append([])
57.                     k[i] = np.array(valores[i][(n*M):((n*M)+((n-1)*M))])
58.                     k[i].shape = (M, (n-1))
59.                     c[i] = np.array(valores[i][((n*M)+((n-1)*M)):((n*M)+((n-
60. 1)*M))+M)])
61.                     c[i].shape = (M,1)
62.             else:
63.                 for i in range(0, n_crom):
64.                     k.append([])
65.                     c.append([])
66.                     k[i] = np.array(valores[i][(n*M):((n*M)+(n-1))])
67.                     k[i].shape = (1, (n-1))
68.                     c[i] = int(np.array(valores[i][((n*M)+(n-1)):((n*M)+(n-1))+1]))
69.         return s,k,c
70.
71. def Selecao_Torneio(codigo_individuos, fitness_valores):
72.     '''
73.     seleciona o vencedor de uma seleção torneio envolvendo k participantes
74.     sem coniderar participantes que já tenham sido selecionados
75.     '''
76.     individuos_torneio = copy.copy(codigo_individuos)
77.     escolhidos = []
78.     for i in range(0,2):
79.         melhor = 100000
80.         selecionados = np.random.choice(individuos_torneio,size=(2,1),replace=False)
81.         selecionados = [int(selecionados[0][0]),int(selecionados[1][0])]
82.         for j in selecionados:
83.             if melhor==100000 or fitness_valores[j] < fitness_valores[melhor]:
84.                 escolhido = j
85.                 melhor = j
86.                 escolhidos.append(escolhido)
87.                 individuos_torneio.remove(str(escolhido))
88.     return escolhidos
89.
90.
91. def Fenotipo_Genotipo(fenotipo_i,n_bit):
92.     '''
93.     converte informações físicas do indivíduo (fenótipo)
94.     em informação genética correspondente (genótipo) por
95.     meio de transformação inteiro - binário.
96.     '''
97.     genotipo_o = str()
98.     for i in range(0,len(fenotipo_i)):
99.         genotipo_o = genotipo_o + str(bin(fenotipo_i[i])[2:].zfill(n_bit))

```

```

100.
101.         return genotipo_o
102.
103.
104.     def Genotipo_Fenotipo(genotipo_i,n_bit):
105.         """
106.         converte informações genéticas (genótipo) do individuo
107.         em informações físicas correspondentes (fenótipo) por
108.         meio de transformação binário - inteiro.
109.         """
110.
111.         fenotipo_o = []
112.         passo = n_bit
113.         gen_info = 0
114.         n_passos = len(genotipo_i)/n_bit
115.         fenotipo_o = []
116.         i=3
117.         for i in range (0,int(n_passos)):
118.             fenotipo_o.append(int(str(genotipo_i[gen_info:gen_info+passo]),2))
119.             gen_info = gen_info + passo
120.
121.         return fenotipo_o
122.
123.
124.     def Crossover_One_Point(pai,mae,n_bit):
125.         """
126.         executa operação de crossover por meio do método
127.         one point tendo como entrada o fenotipo do pai
128.         e mae. Traduz para genotipo por meio de transformação
129.         binária
130.         """
131.         genotipo_pai = Fenotipo_Genotipo(pai,n_bit)
132.         genotipo_mae = Fenotipo_Genotipo(mae,n_bit)
133.
134.         ponto = np.random.randint(1,len(genotipo_pai)-1)
135.
136.         dna_pai_esquerdo = genotipo_pai[:ponto]
137.         dna_pai_direito = genotipo_pai[ponto:]
138.         dna_mae_esquerdo = genotipo_mae[:ponto]
139.         dna_mae_direito = genotipo_mae[ponto:]
140.
141.         genotipo_filho_1 = dna_pai_esquerdo + dna_mae_direito
142.         genotipo_filho_2 = dna_mae_esquerdo + dna_pai_direito
143.
144.         return genotipo_filho_1, genotipo_filho_2
145.
146.
147.     def Crossover_Uniforme_Unico(pai,mae,n_bit):
148.         """
149.         executa operação de crossover por meio do método
150.         uniforme tendo como entrada o fenotipo do pai
151.         e mae. Traduz para genotipo por meio de transformação
152.         binária
153.         """
154.         genotipo_pai = Fenotipo_Genotipo(pai,n_bit)
155.         genotipo_mae = Fenotipo_Genotipo(mae,n_bit)
156.
157.         mascara = list(np.random.randint(0,2,len(genotipo_pai)))
158.
159.         genotipo_filho_1 = str()
160.
161.         k=0
162.         for i in mascara:
163.             if i==0:
164.                 genotipo_filho_1 = genotipo_filho_1 + genotipo_pai[k]
165.             else:

```

```

166.         genotipo_filho_1 = genotipo_filho_1 + genotipo_mae[k]
167.         k = k + 1
168.
169.         return genotipo_filho_1
170.
171.     def Mutacoes(filho1, filho2, prob_m):
172.         '''
173.         para cada bit (alela) dos genes do cromossomo de cada
174.         filho parametrizado, realizar mutações (troca de valor
175.         do bit) com probabilidade indicada prob_m. Retornar
176.         fenótipo dos filhos
177.         '''
178.
179.         filho1_m= str()
180.         filho2_m = str()
181.
182.         for i in filho1:
183.             j = np.random.rand()
184.             if j <= prob_m:
185.                 if i=='1':
186.                     filho1_m=filho1_m+'0'
187.                 else:
188.                     filho1_m=filho1_m+'1'
189.             else:
190.                 if i=='1':
191.                     filho1_m=filho1_m+'1'
192.                 else:
193.                     filho1_m=filho1_m+'0'
194.
195.         for i in filho2:
196.             j = np.random.rand()
197.             if j <= prob_m:
198.                 if i=='1':
199.                     filho2_m=filho2_m+'0'
200.                 else:
201.                     filho2_m=filho2_m+'1'
202.             else:
203.                 if i=='1':
204.                     filho2_m=filho2_m+'1'
205.                 else:
206.                     filho2_m=filho2_m+'0'
207.
208.         fenotipo_filho_1 = Genotipo_Fenotipo(filho1_m,n_bit)
209.         fenotipo_filho_2 = Genotipo_Fenotipo(filho2_m,n_bit)
210.
211.         return fenotipo_filho_1, fenotipo_filho_2
212.
213.
214.     def Algoritmo_Genetico_4(n_itera, n_crom, prob_m, prob_m2, elitismo,n_bit, pe
nalty, servico_min, parametros,r, T,l,n,M,lambd_a, tempos_PM, dist_PM, dist_chegadas
, PPCS, kan):
215.         '''
216.         algoritmo de otimização de simulacao
217.         '''
218.         delt = prob_m2 - prob_m
219.         incr = delt / n_itera
220.
221.
222.         'inicializações'
223.         n_par = np.size(parametros[0])
224.         qtd_filhos = n_crom - elitismo
225.         fitness_valores = []
226.         estoque_valores = []
227.         servico_valores = []
228.         estoque = np.empty(n_crom)
229.         servico = np.empty(n_crom)

```

```

230.         fitness = np.zeros(n_crom)
231.         estoque_filhos = np.zeros(qtd_filhos)
232.         servico_filhos = np.zeros(qtd_filhos)
233.         fitness_filhos = np.zeros(qtd_filhos)
234.         eixo_x_iteracoes = []
235.         eixo_y_min = []
236.         melhor_estoque = []
237.         melhor_servico = []
238.
239.         fitness_valores_filhos = []
240.         for i in range (0,qtd_filhos):
241.             fitness_valores_filhos.append(0)
242.
243.         'povoar geração inicial G0 com n cromossomos'
244.         individuos = Inicializacao_Geracao(n_crom,parametros)
245.
246.         'traduzir parametros para simulação de acordo com politica de controle e
cartões'
247.         s, k, c = Valores_Parametros(individuos, n_crom, M, n, PPCS, kan)
248.
249.         'simulação de cada individuo da geração inicial para estimar desempenho'
250.         for i in range (0, n_crom):
251.             estoque[i], servico[i] = Experimentos_Simulacao_Simplificado_2(r,
T,l,n,M,lambd_a, tempos_PM, dist_PM, dist_chegadas, PPCS, kan, s[i],k[i],c[i])
252.             fitness[i] = estoque[i] + penalty*(np.max((0,servico_min-
servico[i])))
253.             fitness_valores.append(fitness[i])
254.             estoque_valores.append(estoque[i])
255.             servico_valores.append(servico[i])
256.
257.
258.         lista = list(zip(fitness_valores,individuos, estoque_valores, servico_val
ores))
259.         lista.sort()
260.         fitness_valores, individuos, estoque_valores, servico_valores = zip(*list
a)
261.         individuos = list(individuos)
262.         fitness_valores = list(fitness_valores)
263.         estoque_valores = list(estoque_valores)
264.         servico_valores = list(servico_valores)
265.
266.         codigo_individuos=[]
267.         for i in range (0,n_crom):
268.             codigo_individuos.append(str(i))
269.
270.
271.         'iterar até critério de parada'
272.         cont_int=0
273.         while cont_int <= n_itera:
274.
275.             '1) definir pais para povoar próxima geração por meio do método de se
leção torneio'
276.
277.             escolhidos = Selecao_Torneio(codigo_individuos, fitness_valores)
278.             escolhidos_2 = Selecao_Torneio(codigo_individuos, fitness_valores)
279.             escolhidos_3 = Selecao_Torneio(codigo_individuos, fitness_valores)
280.             escolhidos_4 = Selecao_Torneio(codigo_individuos, fitness_valores)
281.             escolhidos_5 = Selecao_Torneio(codigo_individuos, fitness_valores)
282.             escolhidos_6 = Selecao_Torneio(codigo_individuos, fitness_valores)
283.
284.             '2) executar crossover por meio de estratégia uniforme'
285.
286.             genotipo_filho_1 = Crossover_Uniforme_Unico(individuos[escolhidos[0]]
, individuos[escolhidos[1]],n_bit)

```

```

287.         genotipo_filho_2 = Crossover_Uniforme_Unico(individuos[escolhidos_2[0
    ]], individuos[escolhidos_2[1]],n_bit)
288.         genotipo_filho_3 = Crossover_Uniforme_Unico(individuos[escolhidos_3[0
    ]], individuos[escolhidos_3[1]],n_bit)
289.         genotipo_filho_4 = Crossover_Uniforme_Unico(individuos[escolhidos_4[0
    ]], individuos[escolhidos_4[1]],n_bit)
290.         genotipo_filho_5 = Crossover_Uniforme_Unico(individuos[escolhidos_5[0
    ]], individuos[escolhidos_5[1]],n_bit)
291.         genotipo_filho_6 = Crossover_Uniforme_Unico(individuos[escolhidos_6[0
    ]], individuos[escolhidos_6[1]],n_bit)
292.
293.
294.
295.         '3) verificar se os filhos gerados terão mutações genéticas'
296.
297.         filho_1, filho_2 = Mutacoes(genotipo_filho_1, genotipo_filho_2, (prob
    _m2 - (cont_int*incr)))
298.         filho_2_1, filho_2_2 = Mutacoes(genotipo_filho_3, genotipo_filho_4, (
    prob_m2 - (cont_int*incr)))
299.         filho_3_1, filho_3_2 = Mutacoes(genotipo_filho_5, genotipo_filho_6, (
    prob_m2 - (cont_int*incr)))
300.
301.
302.         '4) selecionar indivíduos para a próxima geração através de uma estra
    tégia de elitismo'
303.
304.         filhos = [filho_1, filho_2, filho_2_1, filho_2_2, filho_3_1, filho_3_
    2]
305.         'traduzir parametros para simulação de acordo com politica de control
    e e cartões'
306.         s, k, c = Valores_Parametros(filhos, qtd_filhos, M, n, PPCS, kan)
307.         'verificar fitness dos filhos'
308.         for i in range (0, qtd_filhos):
309.             estoque_filhos[i], servico_filhos[i] = Experimentos_Simulacao_Sim
    plificado_2(r,T,l,n,M,lambd_a, tempos_PM, dist_PM, dist_chegadas, PPCS, kan, s[i],k[
    i],c[i])
310.             fitness_valores_filhos[i] = estoque_filhos[i] + penalty*(np.max((
    0,servico_min-servico_filhos[i])))
311.
312.
313.         'aplicar elitismo'
314.         individuos[n_crom-1] = copy.copy(filho_1)
315.         fitness_valores[n_crom - 1] = copy.copy(fitness_valores_filhos[0])
316.         estoque_valores[n_crom - 1] = copy.copy(estoque_filhos[0])
317.         servico_valores[n_crom - 1] = copy.copy(servico_filhos[0])
318.
319.         individuos[n_crom-2] = copy.copy(filho_2)
320.         fitness_valores[n_crom - 2] = copy.copy(fitness_valores_filhos[1])
321.         estoque_valores[n_crom - 2] = copy.copy(estoque_filhos[1])
322.         servico_valores[n_crom - 2] = copy.copy(servico_filhos[1])
323.
324.         individuos[n_crom-3] = copy.copy(filho_2_1)
325.         fitness_valores[n_crom - 3] = copy.copy(fitness_valores_filhos[2])
326.         estoque_valores[n_crom - 3] = copy.copy(estoque_filhos[2])
327.         servico_valores[n_crom - 3] = copy.copy(servico_filhos[2])
328.
329.         individuos[n_crom-4] = copy.copy(filho_2_2)
330.         fitness_valores[n_crom - 4] = copy.copy(fitness_valores_filhos[3])
331.         estoque_valores[n_crom - 4] = copy.copy(estoque_filhos[3])
332.         servico_valores[n_crom - 4] = copy.copy(servico_filhos[3])
333.
334.         individuos[n_crom-5] = copy.copy(filho_3_1)
335.         fitness_valores[n_crom - 5] = copy.copy(fitness_valores_filhos[4])
336.         estoque_valores[n_crom - 5] = copy.copy(estoque_filhos[4])
337.         servico_valores[n_crom - 5] = copy.copy(servico_filhos[4])
338.

```

```

339.         individuos[n_crom-6] = copy.copy(filho_3_2)
340.         fitness_valores[n_crom - 6] = copy.copy(fitness_valores_filhos[5])
341.         estoque_valores[n_crom - 6] = copy.copy(estoque_filhos[5])
342.         servico_valores[n_crom - 6] = copy.copy(servico_filhos[5])
343.
344.
345.         'ordenar por desempenho para aplicação de elitismo iteração +1'
346.         lista = list(zip(fitness_valores, individuos, estoque_valores, servico
_valores))
347.         lista.sort()
348.         fitness_valores, individuos, estoque_valores, servico_valores = zip(*
lista)
349.         individuos = list(individuos)
350.         fitness_valores = list(fitness_valores)
351.         estoque_valores = list(estoque_valores)
352.         servico_valores = list(servico_valores)
353.
354.         'fim da iteração'
355.         cont_int = cont_int +1
356.         eixo_x_iteracoes.append(cont_int)
357.         eixo_y_min.append(fitness_valores[0])
358.         melhor_estoque.append(estoque_valores[0])
359.         melhor_servico.append(servico_valores[0])
360.
361.         return individuos, fitness_valores, eixo_x_iteracoes, eixo_y_min, melhor_
estoque, melhor_servico, estoque_valores, servico_valores

```


APÊNDICE 6 – RESULTADOS DETALHADOS

QUADRO 39 – RESULTADOS DETALHADOS SCK

| Sistema de Controle Kanban | | | | | | | |
|-----------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|-------------------|-------------------|---------------------|
| Replicações | Estoque cenário 1 | Estoque cenário 2 | Estoque cenário 3 | Estoque cenário 4 | Efeito fator A | Efeito fator B | Efeito interação |
| r1 | 14,983 | 14,376 | 22,951 | 23,753 | 8,6725 | 0,0975 | 0,7045 |
| r2 | 14,867 | 14,132 | 22,752 | 23,541 | 8,647 | 0,027 | 0,762 |
| r3 | 14,98 | 14,058 | 22,959 | 23,628 | 8,7745 | -0,1265 | 0,7955 |
| r4 | 14,735 | 14,28 | 23,048 | 23,956 | 8,9945 | 0,2265 | 0,6815 |
| r5 | 14,966 | 14,136 | 23,05 | 23,936 | 8,942 | 0,028 | 0,858 |
| r6 | 14,846 | 14,2 | 22,791 | 23,732 | 8,7385 | 0,1475 | 0,7935 |
| r7 | 15,092 | 14,451 | 23,007 | 23,814 | 8,639 | 0,083 | 0,724 |
| r8 | 14,695 | 14,389 | 22,701 | 23,55 | 8,5835 | 0,2715 | 0,5775 |
| r9 | 14,619 | 14,044 | 23,196 | 23,609 | 9,071 | -0,081 | 0,494 |
| r10 | 14,716 | 13,9 | 23,099 | 23,836 | 9,1595 | -0,0395 | 0,7765 |
| r11 | 15,139 | 14,097 | 23,093 | 23,599 | 8,728 | -0,268 | 0,774 |
| r12 | 14,883 | 14,314 | 22,831 | 23,633 | 8,6335 | 0,1165 | 0,6855 |
| r13 | 14,946 | 14,188 | 22,951 | 23,786 | 8,8015 | 0,0385 | 0,7965 |
| r14 | 14,855 | 14,319 | 22,802 | 23,944 | 8,786 | 0,303 | 0,839 |
| r15 | 14,729 | 14,363 | 23,107 | 23,551 | 8,783 | 0,039 | 0,405 |
| r16 | 15,199 | 14,178 | 22,832 | 23,738 | 8,5965 | -0,0575 | 0,9635 |
| r17 | 14,955 | 14,182 | 22,651 | 23,708 | 8,611 | 0,142 | 0,915 |
| r18 | 14,892 | 14,267 | 22,897 | 23,753 | 8,7455 | 0,1155 | 0,7405 |
| r19 | 15,066 | 13,825 | 22,949 | 23,758 | 8,908 | -0,216 | 1,025 |
| r20 | 14,755 | 14,113 | 22,947 | 23,732 | 8,9055 | 0,0715 | 0,7135 |
| r21 | 14,838 | 14,182 | 22,986 | 23,623 | 8,7945 | -0,0095 | 0,6465 |
| r22 | 15,344 | 14,232 | 23,023 | 23,674 | 8,5605 | -0,2305 | 0,8815 |
| r23 | 14,9 | 14,119 | 23,007 | 23,901 | 8,9445 | 0,0565 | 0,8375 |
| r24 | 14,913 | 14,032 | 23,097 | 23,732 | 8,942 | -0,123 | 0,758 |
| r25 | 14,806 | 14,249 | 22,933 | 23,625 | 8,7515 | 0,0675 | 0,6245 |
| r26 | 15,002 | 14,585 | 22,975 | 23,654 | 8,521 | 0,131 | 0,548 |
| r27 | 15,122 | 14,434 | 23,106 | 23,731 | 8,6405 | -0,0315 | 0,6565 |
| r28 | 14,829 | 14,325 | 22,842 | 23,954 | 8,821 | 0,304 | 0,808 |
| r29 | 14,661 | 14,161 | 23,206 | 23,531 | 8,9575 | -0,0875 | 0,4125 |
| r30 | 15,119 | 14,083 | 22,813 | 23,259 | 8,435 | -0,295 | 0,741 |
| Média | 14,91507 | 14,20713 | 22,9534 | 23,70803 | 8,769617 | 0,02335 | 0,731283 |
| Variância | 0,029153 | 0,026487 | 0,019717 | 0,023196 | 0,029266 | 0,024917 | 0,021061 |
| Intervalo de confiança t | [14,85 ; 14,98] | [14,15 ; 14,27] | [22,9 ; 23,01] | [23,65 ; 23,76] | [8,71 ; 8,83] | [-0,04 ; 0,08] | [0,68 ; 0,79] |

Fonte: O autor (2019).

QUADRO 40 – RESULTADOS DETALHADOS SCKE-D

| Sistema de Controle Kanban Estendido Dedicado | | | | | | | |
|---|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|----------------|----------------|------------------|
| Replicações | Estoque cenário 1 | Estoque cenário 2 | Estoque cenário 3 | Estoque cenário 4 | Efeito fator A | Efeito fator B | Efeito interação |
| r1 | 14,465 | 14,543 | 19,087 | 19,669 | 4,874 | 0,33 | 0,252 |
| r2 | 14,718 | 14,44 | 19,138 | 19,742 | 4,861 | 0,163 | 0,441 |
| r3 | 15,086 | 14,468 | 19,028 | 19,51 | 4,492 | -0,068 | 0,55 |
| r4 | 14,765 | 14,805 | 19,105 | 19,419 | 4,477 | 0,177 | 0,137 |
| r5 | 14,751 | 14,38 | 19,113 | 19,702 | 4,842 | 0,109 | 0,48 |
| r6 | 14,865 | 14,36 | 19,135 | 19,632 | 4,771 | -0,004 | 0,501 |
| r7 | 15,064 | 14,43 | 19,084 | 19,553 | 4,5715 | -0,0825 | 0,5515 |
| r8 | 15,19 | 14,502 | 18,982 | 19,651 | 4,4705 | -0,0095 | 0,6785 |
| r9 | 14,744 | 14,593 | 19,076 | 19,57 | 4,6545 | 0,1715 | 0,3225 |
| r10 | 14,861 | 14,616 | 19,032 | 19,652 | 4,6035 | 0,1875 | 0,4325 |
| r11 | 14,798 | 14,366 | 18,948 | 19,814 | 4,799 | 0,217 | 0,649 |
| r12 | 15,198 | 14,646 | 19,097 | 19,632 | 4,4425 | -0,0085 | 0,5435 |
| r13 | 14,984 | 14,403 | 18,933 | 19,622 | 4,584 | 0,054 | 0,635 |
| r14 | 14,885 | 14,501 | 18,95 | 19,64 | 4,602 | 0,153 | 0,537 |
| r15 | 14,909 | 14,55 | 19,095 | 19,569 | 4,6025 | 0,0575 | 0,4165 |
| r16 | 15,247 | 14,38 | 19,045 | 19,752 | 4,585 | -0,08 | 0,787 |
| r17 | 14,896 | 14,468 | 19,096 | 19,488 | 4,61 | -0,018 | 0,41 |
| r18 | 14,909 | 14,524 | 19,053 | 19,752 | 4,686 | 0,157 | 0,542 |
| r19 | 14,998 | 14,527 | 19,112 | 19,657 | 4,622 | 0,037 | 0,508 |
| r20 | 14,804 | 14,449 | 19,183 | 19,517 | 4,7235 | -0,0105 | 0,3445 |
| r21 | 14,739 | 14,554 | 19,054 | 19,683 | 4,722 | 0,222 | 0,407 |
| r22 | 14,761 | 14,459 | 19,101 | 19,501 | 4,691 | 0,049 | 0,351 |
| r23 | 14,993 | 14,545 | 18,989 | 19,429 | 4,44 | -0,004 | 0,444 |
| r24 | 14,647 | 14,457 | 19,092 | 19,704 | 4,846 | 0,211 | 0,401 |
| r25 | 14,766 | 14,346 | 19,191 | 19,591 | 4,835 | -0,01 | 0,41 |
| r26 | 15,068 | 14,672 | 19,098 | 19,636 | 4,497 | 0,071 | 0,467 |
| r27 | 14,903 | 14,208 | 19,083 | 19,696 | 4,834 | -0,041 | 0,654 |
| r28 | 14,387 | 14,706 | 19,039 | 19,638 | 4,792 | 0,459 | 0,14 |
| r29 | 14,634 | 14,606 | 19,089 | 19,703 | 4,776 | 0,293 | 0,321 |
| r30 | 15,046 | 14,309 | 19,012 | 19,618 | 4,6375 | -0,0655 | 0,6715 |
| Média | 14,86937 | 14,49377 | 19,068 | 19,62473 | 4,6648 | 0,090567 | 0,466167 |
| Variância | 0,040432 | 0,016105 | 0,004046 | 0,009164 | 0,018608 | 0,018008 | 0,02313 |
| Intervalo de confiança t | [14,79 ; 14,94] | [14,45 ; 14,54] | [19,04 ; 19,09] | [19,59 ; 19,66] | [4,61 ; 4,72] | [0,04 ; 0,14] | [0,41 ; 0,52] |

Fonte: O autor (2019).

QUADRO 41 – RESULTADOS DETALHADOS SCKE-C

| Sistema de Controle Kanban Estendido Compartilhado | | | | | | | |
|--|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|-------------------|-------------------|---------------------|
| Replicações | Estoque cenário 1 | Estoque cenário 2 | Estoque cenário 3 | Estoque cenário 4 | Efeito fator A | Efeito fator B | Efeito interação |
| r1 | 12,155 | 13,986 | 16,527 | 17,968 | 4,177 | 1,636 | -0,195 |
| r2 | 12,268 | 13,757 | 16,364 | 17,736 | 4,0375 | 1,4305 | -0,0585 |
| r3 | 12,498 | 14,024 | 16,117 | 17,961 | 3,778 | 1,685 | 0,159 |
| r4 | 11,793 | 14,066 | 16,168 | 18,061 | 4,185 | 2,083 | -0,19 |
| r5 | 12,096 | 13,935 | 16,276 | 17,796 | 4,0205 | 1,6795 | -0,1595 |
| r6 | 12,421 | 14,359 | 16,056 | 18,16 | 3,718 | 2,021 | 0,083 |
| r7 | 12,199 | 14,127 | 16,48 | 18,005 | 4,0795 | 1,7265 | -0,2015 |
| r8 | 12,385 | 13,837 | 16,284 | 17,959 | 4,0105 | 1,5635 | 0,1115 |
| r9 | 12,336 | 13,967 | 16,459 | 17,771 | 3,9635 | 1,4715 | -0,1595 |
| r10 | 12,191 | 13,998 | 16,479 | 17,549 | 3,9195 | 1,4385 | -0,3685 |
| r11 | 12,188 | 13,849 | 16,464 | 17,964 | 4,1955 | 1,5805 | -0,0805 |
| r12 | 12,38 | 13,405 | 16,224 | 18,131 | 4,285 | 1,466 | 0,441 |
| r13 | 12,43 | 13,542 | 16,445 | 17,783 | 4,128 | 1,225 | 0,113 |
| r14 | 12,291 | 14,387 | 16,051 | 17,711 | 3,542 | 1,878 | -0,218 |
| r15 | 12,024 | 13,981 | 16,353 | 18,196 | 4,272 | 1,9 | -0,057 |
| r16 | 12,382 | 14,148 | 16,097 | 17,549 | 3,558 | 1,609 | -0,157 |
| r17 | 12,215 | 13,64 | 15,875 | 18,207 | 4,1135 | 1,8785 | 0,4535 |
| r18 | 12,032 | 13,578 | 16,124 | 17,859 | 4,1865 | 1,6405 | 0,0945 |
| r19 | 12,123 | 13,96 | 16,361 | 18,083 | 4,1805 | 1,7795 | -0,0575 |
| r20 | 12,284 | 13,991 | 16,436 | 17,69 | 3,9255 | 1,4805 | -0,2265 |
| r21 | 12,338 | 14,269 | 16,331 | 18,218 | 3,971 | 1,909 | -0,022 |
| r22 | 12,361 | 14,023 | 16,163 | 18 | 3,8895 | 1,7495 | 0,0875 |
| r23 | 12,097 | 13,492 | 16,08 | 17,882 | 4,1865 | 1,5985 | 0,2035 |
| r24 | 12,422 | 14,152 | 16,132 | 17,802 | 3,68 | 1,7 | -0,03 |
| r25 | 12,068 | 14,087 | 16,335 | 17,214 | 3,697 | 1,449 | -0,57 |
| r26 | 12,19 | 14,05 | 16,589 | 17,79 | 4,0695 | 1,5305 | -0,3295 |
| r27 | 12,289 | 13,691 | 16,158 | 17,858 | 4,018 | 1,551 | 0,149 |
| r28 | 12,425 | 13,967 | 16,357 | 17,761 | 3,863 | 1,473 | -0,069 |
| r29 | 12,325 | 13,872 | 16,244 | 17,526 | 3,7865 | 1,4145 | -0,1325 |
| r30 | 11,893 | 13,582 | 16,14 | 17,631 | 4,148 | 1,59 | -0,099 |
| Média | 12,23663 | 13,92407 | 16,2723 | 17,8607 | 3,98615 | 1,637917 | -0,049517 |
| Variância | 0,028392 | 0,061651 | 0,029669 | 0,05434 | 0,042719 | 0,039015 | 0,047326 |
| Intervalo de confiança t | [12,17 ; 12,3] | [13,83 ; 14,02] | [16,21 ; 16,34] | [17,77 ; 17,95] | [3,91 ; 4,06] | [1,56 ; 1,71] | [-0,13 ; 0,03] |

Fonte: O autor (2019).